

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **ZAVRŠNI RAD**

**Tihomir Capan**

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **ZAVRŠNI RAD**

Mentor:

Prof. dr. sc. Neven Duić, dipl. ing.

Student:

Tihomir Capan

Zagreb, 2017.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se prof. dr. sc. **Nevenu Duiću** i doc. dr. sc. **Goranu Krajačiću** koji su mi omogućili izradu rada na ovu temu. Nadalje, želio bih se zahvaliti **Hrvoju Dorotiću** na velikodušnoj pomoći prilikom izrade rada.

Tihomir Capan



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:  
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Tihomir Capan** Mat. br.: 0035195006

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Tehno-ekonomska analiza kogeneracijskog postrojenja na biomasu u sklopu drvne industrije**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Techno-economic analysis of a biomass cogeneration plant as part of a wood industry facility**

Opis zadatka:

Povećanje energetske učinkovitosti zemalja članica Europske unije u iznosu od 20% do 2020. godine, jedan je od temeljnih ciljeva klimatsko-energetskog paketa Europske unije donesenog 2008. godine. Prema trenutnim podacima, postavljeni cilj vjerojatno neće biti ispunjen. Otpadna toplina iz industrijskih procesa predstavlja veliki potencijal za smanjenje ukupne potrošnje primarne energije, odnosno povećanje energetske učinkovitosti. U Republici Hrvatskoj postoji određeni broj kogeneracijskih postrojenja koja rade u sklopu drvne industrije, ali ugovori o prodaji električne energije su sklopljeni za vrijeme sustava poticanja koji uključuje poticajne cijene. Cilj ovoga rada je izrada tehno-ekonomske analize kogeneracijskog postrojenja koja uključuje poticanje proizvodnje električne energije tržišnom premijom.

U sklopu rada će se:

1. Izraditi detaljan pregled literature o kogeneracijskim postrojenjima s naglaskom na korištenje biomase, ORC tehnologiju te centralizirane toplinske sustave;
2. Detaljno opisati sustav poticanja tržišnom premijom;
3. Mapirati potrošnja toplinske energije obližnjih objekata i izračunati potrebne investicije u toplinsku mrežu;
4. Razraditi najmanje 4 scenarija među kojima barem jedan obuhvaća pokrivanje toplinskih potreba obližnjih objekata te izraditi tehno-ekonomsku analizu;
5. Provesti analizu s alatom *Bioheat Profitability Assessment Tool* te usporediti rezultate s onima dobivenim u točki 4.

Potrebni podaci i literatura se mogu dobiti kod mentora. U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:  
24. travnja 2017.


Rok predaje rada:  
**2. rok (izvanredni):** 28. lipnja 2017.  
**3. rok:** 22. rujna 2017.

Predviđeni datumi obrane:  
**2. rok (izvanredni):** 30. 06. 2017.  
**3. rok:** 25.9. - 29. 09. 2017.

Zadatak zadao:

  
Prof. dr. sc. Neven Duić

Predsjednik Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Igor Balen

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA .....	IV
POPIS KRATICA .....	V
POPIS OZNAKA .....	VI
SAŽETAK .....	VIII
SUMMARY .....	IX
1. UVOD .....	1
2. TEHNIČKE I EKONOMSKE KARAKTERISTIKE ISKORIŠTAVANJA BIOMASE .....	3
2.1. Biomasa .....	3
2.2. Kogeneracijska postrojenja na biomasu .....	4
2.2.2. Podjela tehnologija korištenja biomase s obzirom na tehnološki proces .....	6
2.2.3. Kogeneracija u Hrvatskoj .....	8
2.3 Centralizirani toplinski sustavi .....	9
2.3.1. Centralizirani toplinski sustavi u Hrvatskoj .....	10
3. POTICANJE PROIZVODNJE ELEKTRIČNE ENERGIJE TRŽIŠNOM PREMIJOM .....	13
3.1. Način izračuna tržišne premije .....	14
4. METODA .....	16
4.1. Tehnički proračun postrojenja .....	16
4.1.1. Proračun nazivnog električnog opterećenja i potrošnje električne energije pilane .....	16
4.1.2. Proračun toplinskog opterećenja i godišnje potrošnje toplinske energije pilane .....	17
4.1.3. Mapiranje toplinskih potreba .....	18
4.2. Ekonomska analiza postrojenja .....	23
4.2.1. Prihodi .....	23
4.2.2. Rashodi .....	25
4.3. Izračun investicijskog troška izgradnje ORC postrojenja .....	26
4.4. Izračun investicijskog troška izgradnje CTS-a .....	27
4.5. Bioheat Profitability Assessment Tool .....	27
4.5.1. Wood Fuel Parameters Tool .....	27
4.5.2. Plant Dimensioning Tool .....	28
5. ANALIZA SLUČAJA .....	29
5.1. Scenarij 1 .....	29
5.2. Scenarij 2 .....	30
5.3. Scenarij 3 .....	33
5.4. Scenarij 4 .....	33
6. REZULTATI .....	36
6.1. Rezultati mapiranja toplinskih potreba i projektiranja CTS-a .....	36
6.2. Rezultati tehnno-ekonomske analize kogeneracijskog postrojenja .....	38
6.2.1. Scenarij 1 .....	38
6.2.2. Scenarij 2 .....	40

---

6.2.3. Scenarij 3 .....	43
6.2.4. Scenarij 4 .....	45
6.3. Bioheat Profitability Assessment Tool .....	49
7. ZAKLJUČAK.....	51
ZAHVALA .....	53
LITERATURA .....	54
PRILOZI .....	56

**POPIS SLIKA**

Slika 1.	Potencijal biomase u Republici Hrvatskoj .....	3
Slika 2.	Grafički prikaz usporedbe energetske gubitaka.....	4
Slika 3.	Usporedba ORC-a i parnoturbinskog procesa [6].....	7
Slika 4.	Ilustrativni prikaz CTS-a u Republici Hrvatskoj [10].....	11
Slika 5.	Toplana na biomasu u Pokupskom [12].....	12
Slika 6.	Mogući modeli subvencioniranja prodaje električne energije [13] .....	14
Slika 7.	Odnos poticajne, referentne i tržišne cijene [13] .....	15
Slika 8.	Preporuke pri izboru tehnologije iskorištavanja biomase [3] .....	16
Slika 9.	Krivulja potrošnje električne energije tijekom radnog dana.....	17
Slika 10.	Kategorizacija zgrada s obzirom na godišnju potrošnju toplinske energije .....	22
Slika 11.	Kategorizacija građevina s obzirom na broj katova .....	22
Slika 12.	Specifični investicijski trošak ORC postrojenja.....	26
Slika 13.	Rezultati proračuna parametara goriva.....	28
Slika 14.	Shema moguće izvedbe postrojenja .....	29
Slika 15.	Dnevni dijagram proizvodnje i potrošnje električne energije .....	31
Slika 16.	Dijagram kretanja tržišne cijene u odnosu na referentnu cijenu .....	32
Slika 17.	Sušare za drvo.....	33
Slika 18.	CTS Krasno .....	36
Slika 19.	Raspodjela investicijskog troška u cjevovod.....	37
Slika 20.	Raspodjela korištenja energije u Scenariju 1.....	39
Slika 21.	Raspodjela prihoda u Scenariju 2 .....	41
Slika 22.	Analiza osjetljivosti Scenarija 2 .....	42
Slika 23.	Raspodjela prihoda u Scenariju 3 .....	44
Slika 24.	Analiza osjetljivosti Scenarija 3 .....	45
Slika 25.	Raspodjela korištenja energije u Scenariju 4.....	47
Slika 26.	Raspodjela prihoda u Scenariju 4 .....	47
Slika 27.	Analiza osjetljivosti Scenarija 4 .....	48

## POPIS TABLICA

Tablica 1.	Tehnološki procesi kod kogeneracijskih postrojenja [3] .....	6
Tablica 2.	Registar projekata OIEKPP .....	9
Tablica 3.	Kategorizacija zgrada pri toplinskom mapiranju .....	19
Tablica 4.	Katalog predizoliranih cijevi tvrtke ISOPLUS [14] .....	21
Tablica 5.	Sažeti prikaz tehničkih i ekonomskih parametara postrojenja u scenarijima .....	34
Tablica 6.	Osnovni ulazni parametri .....	34
Tablica 7.	Zbirni prikaz rezultata proračuna CTS-a .....	37
Tablica 8.	Rezultati tehno-ekonomske analize Scenarija 1 .....	39
Tablica 9.	Rezultati tehno-ekonomske analize Scenarija 2 .....	41
Tablica 10.	Rezultati tehno-ekonomske analize Scenarija 3 .....	43
Tablica 11.	Rezultati tehno-ekonomske analize Scenarija 4 .....	46
Tablica 12.	Sinteza rezultata tehno-ekonomske analize .....	49
Tablica 13.	Usporedba rezultata proračuna i alata Bioheat Profitablity Assessment Tool.....	50



## POPIS KRATICA

Kratika	Puni naziv
ZOIEiVIK	Zakon o obnovljivim izvorima energije i visokoučinkovitoj kogeneraciji
OIE	Obnovljivi izvori energije
CTS	Centralizirani toplinski sustav
ORC	Organski Rankinov ciklus
Registar OIEKPP	Registar projekata i postrojenja za korištenje obnovljivih izvora energije
HROTE	Hrvatski operator tržišta energije
NPV	Neto sadašnja vrijednost
IRR	Unutarnja stopa povrata
DPP	Diskontirani period povrata

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
$A_g$	$m^2$	Grijana površina građevine
$C_d$	$kn/m^3$	Specifično povećanje vrijednosti osušene drvene mase
$C_e$	$kn/MWh$	Kupovna cijena električne energije
$C_n$	$kn/kW$	Tarifna stavka snaga
$C_q$	$kn/kWh$	Tarifna stavka toplina
$C_{tei}$	$kn/MWh$	Tržišna cijena električne energije u i-tom satu
$c_w$	$kJ/kgK$	Specifični toplinski kapacitet vode
$E_{ti}$	$MWh$	Količina prodane energije u i-tom satu
$E_u$	$MWh$	Ušteda električne energije
$F_1$	-	Faktor oblika i položaja zgrade
$Kdr_i$	$W/mK$	Koeficijent gubitka
$l_i$	$m$	Duljina pojedine grane cjevovoda
$P_{dm}$	$kn$	Prihod od povećanja vrijednosti drve mase
$P_n$	$kn$	Prihod od naknade za osiguranu snagu
$P_p$	$kn$	Prihod od prodaje električne energije na tržištu
$P_q$	$kn$	Prihod od naknade za isporučenu toplinsku energiju
$P_{tp}$	$kn$	Prihod od tržišne premije
$P_u$	$kn$	Prihod od uštede električne energije
$q_{mw}$	$kg/s$	Maseni protok vode u pojedinoj grani
$Q_{ni}$	$kWh$	Isporučena toplina
$Q_{ns}$	$kWh$	Godišnja potrošnja topline sušara
$Q_s$	$kWh/m^3$	Specifična toplinska potrošnja sušare
$q_s$	$kWh/god \cdot m^2$	Specifična potrošnja toplinske energije

$q_v$	$m^3/s$	Volumni protok vode
$RV$	$kn/kWh$	Referentna vrijednost električne energije
$RV_{max}$	$kn/kWh$	Maksimalna referentna cijena
$TC_i$	$kn/kWh$	Referentna tržišna cijena električne energije
$TP_i$	$kn/kWh$	Tržišna premija
$V_d$	$m^3/god$	Volumen drvene mase
$V_s$	$m^3$	Kapacitet sušare
$\vartheta_{pol}$	$^{\circ}C$	Temperatura polaza vode
$\vartheta_{pov}$	$^{\circ}C$	Temperatura povrata vode
$\vartheta_s$	$^{\circ}C$	Srednja temperatura u cjevovodu
$\rho_w$	$kg/m^3$	Gustoća vode
$\Phi_g$	$W$	Toplinsko opterećenje građevine
$\Phi_G$	$kW$	Ukupni toplinski gubitak
$\Phi_{Gi}$	$W$	Toplinski gubitak grane cjevovoda
$\Phi_{ni}$	$kW$	Potrošnja toplinske energije pojedinog potrošača
$\Phi_{ns}$	$kW$	Nazivno toplinsko opterećenje sušara,
$\Phi_T$	$kW$	Maksimalno toplinsko opterećenje grane

## SAŽETAK

Ulaskom u Europsku uniju Republika Hrvatska se obvezala sukladno svojim mogućnostima i prirodnim obilježjima povećati udio energije iz obnovljivih izvora energije i smanjiti štetan utjecaj na okoliš. Jedan od obnovljivih izvora energije prisutan na gotovo svim područjima je biomasa.

U ovome radu provedena je tehno-ekonomska analiza kogeneracijskog postrojenja na biomasu na konkretnom primjeru – pilani. Cilj rada bio je ispitati utjecaj subvencija na isplativost projekta, pri čemu je naglasak stavljen na poticanje tržišnom premijom. Koristeći ulazne podatke iz prakse i postojeću literaturu, analizirana su četiri scenarija koji uključuju izgradnju kotla na biomasu i ORC postrojenje, a jedan od scenarija i izgradnju centraliziranog toplinskog sustava.

Nakon iznošenja teorijskih osnova o kogeneracijskim postrojenjima i načina odabira odgovarajuće tehnologije, objašnjene su metode korištene u proračunu. Provedeno je toplinsko mapiranje objekata u blizini proizvodnog pogona, čiji su rezultati korišteni pri analizi. Rezultati mapiranja pokazali su kako rijetka gustoća naseljenosti uzrokuje visoke specifične investicijske troškove te relativno nisku dobit uslijed prodaje toplinske energije. Analiza scenarija pokazala je neisplativost gradnje postrojenja bez subvencionirane prodaje električne energije. Utvrđeno je kako je najisplativiji scenarij prodaja električne energije uz subvenciju te korištenje otpadne topline u vlastitim sušarama. Unutarnja stopa povrata najisplativijeg scenarija iznosi 14% u periodu od 10 godina. Važno je naglasiti kako veća snaga postrojenja omogućava ugovaranje niže referentne cijene čime se povećavaju izgledi za odobravanje subvencioniranja.

U okviru ovoga rada proučen je i alat *Bioheat Profitability Assessment Tool*. Alat se nije pokazao prikladnim za razradu scenarija, ali su njime izračunate određene vrijednosti korištene u proračunu te su uspoređene s prethodno dobivenim vrijednostima. Utvrđeno je kako je alat uz jednostavnost primjene točan i koristan za okvirni proračun kotlovskog postrojenja.

Ključne riječi: kogeneracijsko postrojenje, biomasa, ORC, tržišna premija, bioheat profitability assessment tool

## SUMMARY

By entering the European Union, Republic of Croatia committed to increase share of renewable energy in final consumption and battle the climate change. In order to contribute to the common goals it is necessary to focus efforts into renewable energy sources. A great potential acknowledged in Croatia is biomass.

In this thesis a techno-economic analysis of a biomass cogeneration plant has been conducted on the real-life example – sawmill. The main goal was to investigate the influence of subsidies on project's economical viability, with a special accent on the feed-in-premium model. Four scenarios have been investigated based on the practical data and literature. They include biomass powered boiler, ORC module and in one of them ORC is connected to the district heating network.

After the literature review on cogeneration plants and the ways of selecting the proper technological solution, the calculation methods are explained. Heat mapping of the nearby objects has been conducted, and the results have been used later in the calculation. The results show that low population density causes high specific investment costs and low return. The results of the techno-economic analysis are presented, different scenarios are compared and the most feasible solution in terms of technological and economical viability is identified. The most feasible solution is selling the electricity on the market with the feed-in-premium and using the waste heat for wood drying kilns in-house. The internal return rate of this scenario equals 14% for the period of 10 years.

In this thesis the *Bioheat Profitability Assessment Tool* has also been studied. The tool does not seem to be appropriate for this type of analysis, but several values have been calculated and compared with values used in the calculation. The results show that this simple-to-use tool is an accurate enough and useful for approximate calculations.

Key words: cogeneration plant, biomass, ORC, feed-in-premium, bioheat profitability assessment tool

## 1. UVOD

Potpisivanjem i ratifikacijom Pariškog sporazuma Republika Hrvatska postala je aktivni sudionik u ostvarivanju najambicioznijeg plana za borbu protiv klimatskih promjena [1]. Sporazumom su jasno definirani globalni ciljevi; ostvarivanje porasta prosječne svjetske temperature na razini manjoj od 2°C u odnosu na predindustrijsko razdoblje, smanjenje emisija CO<sub>2</sub> i usmjeravanje novca prema niskougljičnom razvoju. Pojedinačnoj potpisnici omogućeno je samostalno integrirati održivi razvoj u postojeći gospodarski sustav i tako doprinijeti zajedničkom cilju. Sporazumom se također nastoji osigurati transparentnost i financijska potpora kako bi se navedeni ciljevi i ostvarili.

S obzirom na geografski položaj i prirodne posebnosti Republike Hrvatske potencijal za razvoj obnovljivih izvora energije (OIE) postoji u obliku vode, vjetra, sunca, biomase i geotermalne energije. Ulaganjem u projekte koji će koristiti navedene potencijale moguće je značajno doprinijeti ostvarivanju ciljeva Pariškog sporazuma, a istodobno ojačati nacionalno gospodarstvo i smanjiti ovisnost energetskeg sektora o uvozu. Jedan od glavnih nacionalnih ciljeva je povećanje energetske učinkovitosti u iznosu od 20% do 2020. godine.

Republika Hrvatska je zemlja vrlo bogata šumom, te postoji tradicija šumarstva i drvne industrije. Iako ima vrlo razvijen sustav gospodarenja šumom, i dalje postoji prostor za napredak u smislu razvoja domaće drvne industrije te kvalitetnijeg iskorištavanja šumske biomase, a posebno otpada iz drvne industrije [2], [3].

Energetski najučinkovitiji način za iskorištavanje energije sadržane u biomasi jest pretvorba njene kemijske energije u električnu i toplinsku u kogeneracijskom postrojenju. Budući da su ulaganja u takva postrojenja visoka, a period povrata investicije u takve pogone relativno dug, investitore je potrebno subvencionirati kako bi se potaknula ulaganja. U Republici Hrvatskoj je u pogonu određeni broj kogeneracijskih postrojenja na biomasu koja su uključena u sustav poticanja poticajnom cijenom električne energije. Sukladno novom Zakonu o obnovljivim izvorima energije i visokoučinkovitoj kogeneraciji (ZOIEiVIK) *NN 100/15* [4] uvodi se novi sustav poticanja

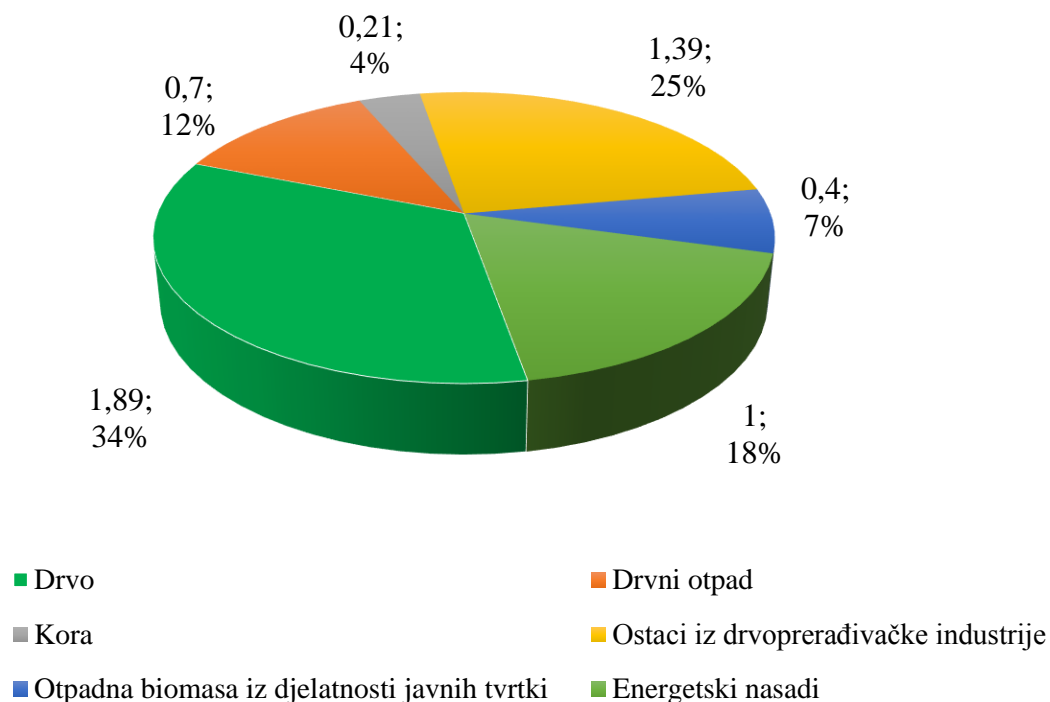
proizvodnje električne energije tržišnom premijom. Osnovna razlika između poticajne cijene i tržišne premije jest u tome što iznos subvencije više nije fiksna te je dio tržišnog rizika sada i na proizvođaču električne energije. S obzirom na to da je rizik kojemu je izložen investitor veći, potrebne su detaljnije i preciznije analize prije donošenja odluke o ulasku u investiciju. Postojeća literatura daje smjernice za izradu tehno-ekonomske analize kogeneracijskog postrojenja, ali ne uključuje analizu utjecaja tržišne premije [3]. Cilj ovog rada je odabir tehnički, ekonomski i ekološki prihvatljivog rješenja kogeneracijskog postrojenja za odabranu lokaciju te istraživanje utjecaja tržišne subvencije na isplativost projekta.

## 2. TEHNIČKE I EKONOMSKE KARAKTERISTIKE ISKORIŠTAVANJA BIOMASE

### 2.1. Biomasa

Biomasa je definirana kao biorazgradivi dio proizvoda, ostataka i otpadaka od poljoprivrede, šumarstva i drvne industrije. Mogućnosti za iskorištavanje biomase su brojne, a ona se smatra obnovljivim izvorom energije jer je neutralna u odnosu na emisije CO<sub>2</sub>. Slika 1. prikazuje potencijal otpadne drvene mase iz industrije u kontekstu raspoložive biomase u Hrvatskoj u mil. m<sup>3</sup> [2].

**Potencijal biomase u Republici Hrvatskoj [mil. m<sup>3</sup>]**



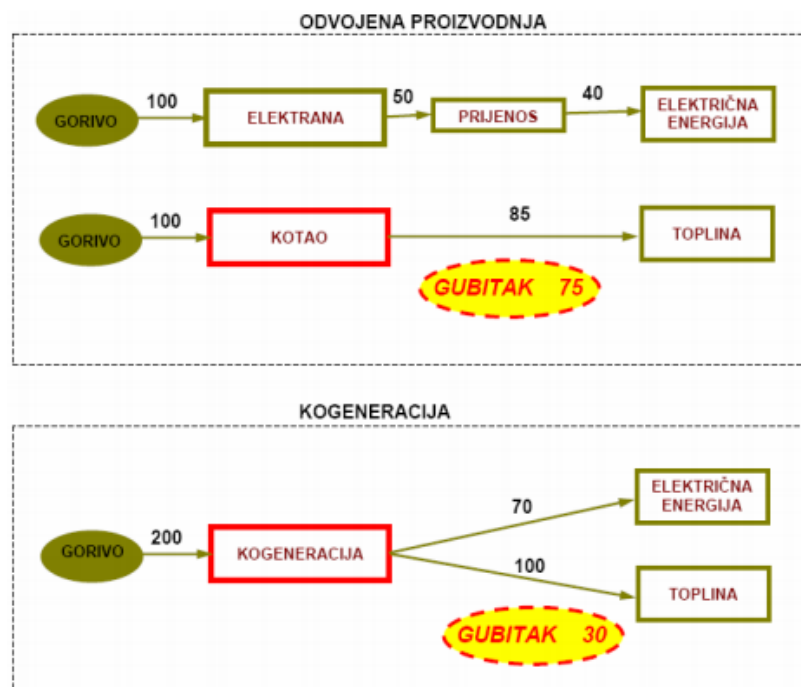
**Slika 1. Potencijal biomase u Republici Hrvatskoj**



Najveći iskorak očekuje se u intenzivnijoj primjeni biomase umjesto fosilnih goriva, posebno u postojećim centraliziranim toplinskim sustavima (CTS), ali i u izgradnji novih sustava. Očekuje se i korištenje biomase u drvenoj industriji za pokrivanje potreba za toplinskom i električnom energijom, što će ovisiti o kretanjima u drvenoj industriji koja trenutno bilježi uzlazni trend [5].

## 2.2. Kogeneracijska postrojenja na biomasu

Kogeneracija je tehnologija istovremene proizvodnje električne i toplinske energije, a veličina postrojenja varira od nekoliko kWe do nekoliko stotina MWe. Potencijalne lokacije primjene su ona mjesta gdje istodobno postoji potreba za električnom i toplinskom energijom. Osnovna karakteristika kogeneracijskog postrojenja je smanjena potrošnja primarne energije u odnosu na odvojenu proizvodnju električne i toplinske energije za čak 40%, a samim time je i smanjen negativan utjecaj na okoliš. Ilustraciju usporedbe gubitaka odvojene i kogeneracijske proizvodnje prikazuje Slika 2.



**Slika 2. Grafički prikaz usporedbe energetske gubitaka**

Glavne prednosti kogeneracije su: učinkovitije korištenje goriva, niži troškovi proizvodnje te manje štetnih emisija po jedinici proizvedene energije. Kao nedostatak se kod nekih tehničkih izvedbi spominju kruta povezanost proizvodnje električne i toplinske energije. Kod kogeneracijskih postrojenja povezanih sa centraliziranim toplinskim sustavima problem je i smanjena potreba za toplinskom energijom u ljetnim mjesecima.

### *2.2.1. Podjela tehnologija korištenja biomase s obzirom na način pretvorbe energije*

U kogeneracijskom postrojenju na biomasu osnovni način pretvorbe energije sadržane u kemijskim vezama jest izravnim izgaranjem biomase u ložištu pri čemu se stvaraju dimni plinovi visoke temperature, a potom se njihova povećana entalpija iskorištava nekim od tehnoloških procesa. Budući da je izgaranje konvencionalna tehnologija, s dugom tradicijom primjene, odlikuju ga niži investicijski troškovi i mogućnost korištenja različitih oblika biomase (peleti, sječka, komadno drvo, itd.). Nadalje, kotlovi za izgaranje biomase se izrađuju u širokom rasponu snaga te vrlo dobro kompenziraju varijabilnu ogrjevnu vrijednost biomase koja se javlja kao posljedica različitog sastava i vlažnosti. S obzirom na način izvedbe ložišta, izgaranje biomase se najčešće odvija na rešetki, u mjehuričastom fluidiziranom sloju ili u cirkulirajućem fluidiziranom sloju. Izvedba kotla odabire se po specifikacijama proizvođača na osnovu traženog kapaciteta te vrste i kvalitete biomase na raspolaganju.

Rasplinjavanje goriva predstavlja alternativni način iskorištavanja energije goriva. Ono omogućava dobivanje reaktorskog plina iz krute biomase, koji se kasnije može koristiti za pogon plinske turbine ili motora, gorivnih članaka, u proizvodnji etanola i sl. U usporedbi s izgaranjem, rasplinjavanje je slabije komercijalizirano, broj proizvođača postrojenja je manji te su investicijski troškovi veći. Nadalje, zbog nečistoća u reaktorskom plinu, proizvodno postrojenje je vrlo kompleksno kako bi se uspješno otklonili svi onečišćivači. Rasplinjavanje goriva prikladnije je za veće kapacitete budući da se povećanjem kapaciteta smanjuju specifični investicijski troškovi [3].

### 2.2.2. Podjela tehnologija korištenja biomase s obzirom na tehnološki proces

Osim po načinu primarne pretvorbe energije, kogeneracijska postrojenja se razlikuju i prema tehnološkom procesu. Tehnološke procese koji se najčešće primjenjuju kod kogeneracijskih postrojenja na biomasu prikazuje Tablica 1.

**Tablica 1. Tehnološki procesi kod kogeneracijskih postrojenja [3]**

Procesi u kombinaciji s izgaranjem	Procesi u kombinaciji s rasplinjavanjem
Postrojenje parne turbine	Plinski motor
Parni motor	Plinska turbine s indirektnim zagrijavanjem
Organski Rankinov ciklus (ORC)	-

#### 2.2.2.1. Postrojenje parne turbine

Najveći dio kogeneracijskih postrojenja loženih na biomasu koristi povišenu entalpiju dimnih plinova za pogon desnokretnog Rankinovog ciklusa u postrojenju parne turbine. U procesu se napojna voda zagrijava i isparava u generatoru pare, te se pregrijava do stanja koje osigurava ekspanziju u turbini do stanja suhozasićene pare. Nakon ekspanzije u turbini para kondenzira, pumpa se u napojni spremnik gdje se otplinjava, a zatim odvodi u kotao. Kod kogeneracijskih postrojenja postoji nekoliko tehničkih izvedbi parnih turbina, ovisno o potrebama za toplinskom i električnom energijom. Najčešće se primjenjuju izvedbe s protutlačnom turbinom, s kondenzacijskom turbinom ili izvedba s kondenzacijskom turbinom s reguliranim oduzimanjem. Parnoturbinska postrojenja primarno su namijenjena za veće nazivne snage te je donja granica konvencionalne upotrebe 1 MWe. Glavni nedostatak kogeneracijskih parnoturbinskih postrojenja jest smanjenje stupnja djelovanja postrojenja u radu pri smanjenom opterećenju.

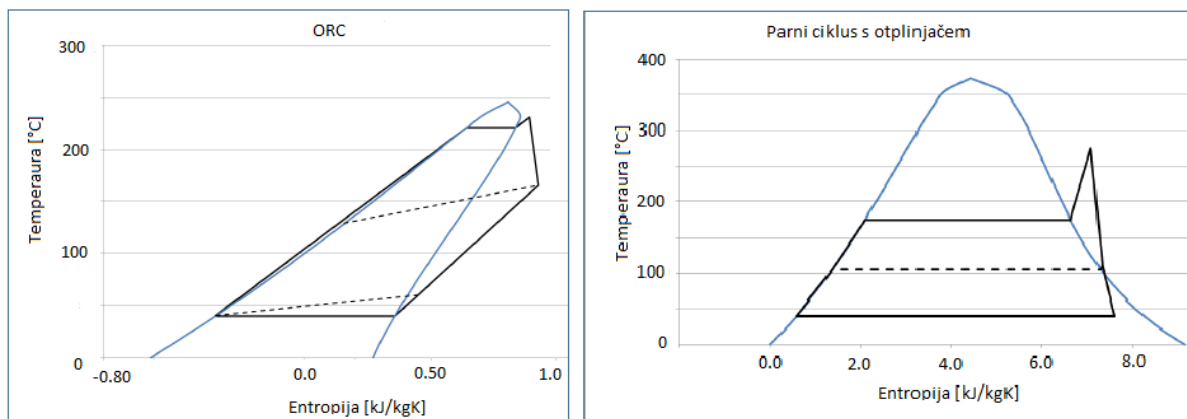
#### 2.2.2.2. Plinska turbina s indirektnim izgaranjem

Plinska turbina s indirektnim izgaranjem predstavlja novi i potencijalno najisplativiji način iskorištavanja drvnog ostatka. Dosadašnji podaci navode električnu iskoristivost do 20% i niže

specifične investicijske troškove u odnosu na procese s Rankinovim ciklusom. Osnovna razlika u odnosu na običnu plinsku turbinu jest da se radni medij (zrak, helij,  $\text{CO}_2$ ) zagrijava vanjskim izmjenjivačem topline tj. ne postoji klasična komora izgaranja. Toplina za zagrijavanje radnog medija dobiva se izgaranjem krute biomase ili reaktorskih plinova ( $800^\circ\text{C}$ ). Plinsku turbinu moguće je izvesti kao otvorenu (kao radni medij koristi se zrak koji se ispušta s dimnim plinovima) ili kao zatvorenu pri čemu radni medij obavlja zatvoreni kružni proces čime se poboljšava ukupna iskoristivost procesa.

### 2.2.2.3 Organski Rankinov ciklus

Organski Rankinov ciklus (ORC) je varijacija opisanog Rankinovog ciklusa u kojem se kao radni medij umjesto vodene pare koristi organski fluid (silikonsko ulje, izopentan, izooktan, amonijak, itd.). Osnovna razlika ORC-a i ciklusa s vodenom parom je u termodinamičkim svojstvima organskog medija i vodene pare. Uz veću gustoću organskog radnog medija, karakterističan je i negativan nagib linije napetosti kapljevinapara koji omogućava ekspanziju pare u pregrijano područje. Nadalje, zbog niže temperature isparavanja moguća je izmjena topline na nižim temperaturama zbog čega se ORC koristi za iskorištavanje geotermalne energije i otpadne topline iz industrijskih procesa. U nastavku se nalazi Slika 3. kojom je prikazana usporedba ORC i parnog ciklusa u T-s dijagramu.



**Slika 3. Usporedba ORC-a i parnoturbinskog procesa [6]**

Uz mogućnost izmjene topline na nižim temperaturama osnovne prednosti ORC-a su [3]:

- visok stupanj djelovanja na nižim opterećenjima
- raspon instaliranih snaga od 40 kWe do 15M We
- vrlo visoki stupanj automatizacije i autonomnost rada (nije potreban operater)

Kao glavni nedostaci ističu se:

- visoki investicijski troškovi
- potreba za poduzimanjem dodatnih mjera za sprječavanje propuštanja radnog medija iz sustava
- zapaljivost radnog medija na sobnim temperaturama

### ***2.2.3. Kogeneracija u Hrvatskoj***

U Republici Hrvatskoj je do kraja 2016. godine registrirano šest kogeneracijskih postrojenja na biomasu u sustavu subvencioniranja poticajnom cijenom. Postrojenja u pogonu, kao i ona za koja postoje planovi za izgradnju upisana su u Registar OIEKPP (Registar projekata i postrojenja za korištenje obnovljivih izvora energije i kogeneracije). Tablica 2. predstavlja postrojenja u pogonu kao i planirane projekte upisane u registar s obzirom na tehnologiju proizvodnje električne energije. Vidljivo je kako je udio kogeneracijskih postrojenja po broju i snazi malen, a trenutno ne postoje registrirani planovi za izgradnju kogeneracijskih postrojenja na biomasu. S druge strane zbog zakonskih postavki postoji veći broj elektrana na biomasu koje iskorištavaju otpadnu toplinu. [7].

**Tablica 2. Registar projekata OIEKPP [7]**

<b>Tip postrojenja</b>	<b>Broj elektrana, u pogonu</b>	<b>Snaga [kW]</b>	<b>Broj elektrana, nositelji projekata</b>	<b>Snaga [kW]</b>
<b>Vjetroelektrane</b>	18	412.000	10	326.000
<b>Sunčane elektrane</b>	1.219	49.479	6	3.892
<b>Hidroelektrane</b>	11	3.885	8	4.164
<b>Elektrane na biomasu</b>	12	25.955	55	93.972
<b>Elektrane na bioplin</b>	26	30.435	25	25.785
<b>Kogeneracijska postrojenja</b>	6	113.293	0	0
<b>Elektrane na deponijski plin</b>	1	3.000	0	0
<b>Elektrane na plin iz postrojenja za pročišćavanje otpadnih voda</b>	1	2.500	0	0
<b>Geotermalne elektrane</b>	0	0	1	10.000
<b>Ukupno</b>	<b>1.294</b>	<b>640.547</b>	<b>105</b>	<b>463.831</b>

### 2.3 Centralizirani toplinski sustavi

Centralizirani toplinski sustavi (CTS) sustavi su koji proizvode paru, vrelu ili toplu vodu u centralnom postrojenju te je distribuiraju do individualnih potrošača cijevnim razvodom. Osnovne komponente od kojih se sastoji CTS su izvor topline, distribucijski sustav i toplinske podstanice. Ovakav sustav pogodan je za područja s većom gustoćom naseljenosti i većim toplinskim opterećenjem, odnosno potražnjom – velikim brojem stanova ili postojanjem industrije koja ima potrebu za toplinskom energijom. Kućanstva spojena na CTS koriste isporučenu toplinsku energiju za grijanje prostora, pripremu potrošne tople vode ili za kondicioniranje zraka u sustavu klimatizacije. U zgradama povezanim na CTS ne postoji potreba za ugradnjom individualnih kotlova, spremnika ili dovoda goriva i dimovoda jer toplinska energija dolazi iz centralnog postrojenja. Nadalje, osim komfornosti upotrebe, CTS donosi mnogobrojne prednosti, a one su[8]:

- Veća energetska učinkovitost
- Lakoća upravljanja i održavanja
- Pouzdana, neprekidna i jednostavna opskrba toplotom
- Dugoročna ušteda financijskih sredstava
- Mogućnost korištenja različitih goriva
- Velika mogućnost centralne i individualne regulacije
- Smanjenje troškova izgradnje objekata koji se spajaju na CTS
- Smanjenje štetnih emisija u odnosu na sustave pojedinačnog grijanja

Iako CTS donosi mnoge prednosti i dugoročno je opravdan, izgradnja sustava je vrlo skupa, a kako bi sustav bio isplativ potrebno je zadovoljiti osnovne uvjete:

- Dovoljno veliku potrebu za toplotom na što manjoj udaljenosti od izvora
- Dostupnost jeftinog izvora toplinske energije

Kao najjeftiniji izvori toplinske energije u modernim CTS sustavima najčešće se koriste: otpadna toplota iz kogeneracijskih postrojenja, korisna toplota dobivena spaljivanjem otpada ili iz industrijskih procesa, toplota dobivena izgaranjem biomase te obnovljivi izvori energije kao što su geotermalna ili sunčeva energija. U modernim sustavima područnog grijanja u svrhu povećanja energetske učinkovitosti koriste se niži temperaturni režimi tj. niže polazne temperature ogrjevnog medija, te se teži što kvalitetnijoj izolaciji cijevnog razvoda kako bi se maksimalno smanjili gubici. U budućnosti se očekuje da će CTS-i biti neizostavni dio energetskeg sustava jer će omogućiti skladištenje električne energije u obliku topline čime će se lakše smanjivati viškovi električne energije proizvedeni iz obnovljivih izvora energije.

### ***2.3.1. Centralizirani toplinski sustavi u Hrvatskoj***

U Republici Hrvatskoj CTS-i dobavljaju oko 14% ukupne opskrbe toplinskom energijom, a prisutni su u 19 gradova. Slika 4. u nastavku prikazuje lokacije CTS-a u Republici Hrvatskoj.

Osnovna značajka većine postojećih sustava je prijenos topline vrelom vodom temperature veće od  $100^{\circ}\text{C}$  zbog visoke specifične toplinske potrošnje i zastarjele infrastrukture koja uzrokuje značajne gubitke u sustavu. Visoka potrošnja uzrokovana je lošom toplinskom izolacijom ovojnica zgrada, a iznosi između  $150\text{--}250\text{ kWh/m}^2$ . Najčešće korišteno gorivo je prirodni plin (80%), slijedi ga loživo ulje, a udio obnovljivih izvora energije je zanemariv. Zabrinjavajuća je i činjenica kako su samo 3 CTS-a spojena na kogeneracijsko postrojenje [9].



**Slika 4. Ilustrativni prikaz CTS-a u Republici Hrvatskoj [10]**

U budućnosti se očekuje povećanje broja korisnika, rekonstrukcija postojećih distribucijskih sustava, ali i izgradnja novih CTS-a. [9]. Očekuje se i okretanje ka obnovljivim izvorima energije i iskorištavanje otpadne topline iz kogeneracijskih ili industrijskih postrojenja. Nakon implementacije mjera energetske učinkovitosti u zgradarstvu tj. ugradnje izolacije, očekuje se i snižavanje temperaturnih režima [11]. Posljednji centralizirani toplinski sustav u Republici



Hrvatskoj izgrađen je 2015. g. u Pokupskom i danas opskrbljuje 15 potrošača ukupnom nazivnom snagom 1 MWt. Slika 5. prikazuje toplanu na biomasu u Pokupskom.

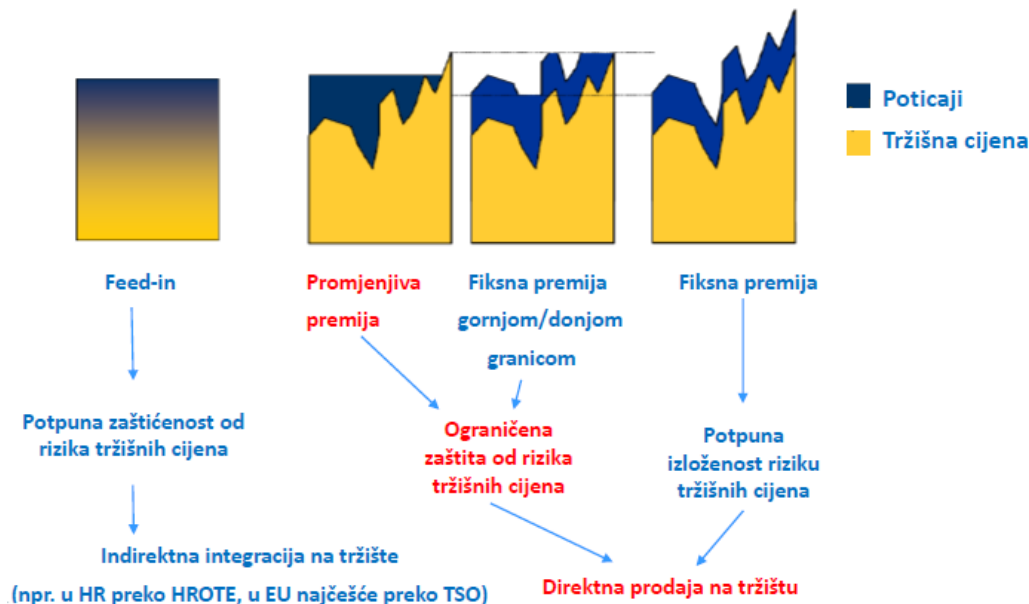


**Slika 5. Toplana na biomasu u Pokupskom [12]**

### 3. POTICANJE PROIZVODNJE ELEKTRIČNE ENERGIJE TRŽIŠNOM PREMIJOM

Sukladno regulativi Europske unije 2015. godine unije donesen je ZOIEiVIK [4]. Zakonom je između ostalog uređeno planiranje, poticanje proizvodnje i potrošnje električne energije iz obnovljivih izvora i visokoučinkovitih kogeneracijskih postrojenja. Osnovna svrha zakona je promicanje proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora i visokoučinkovite kogeneracije na mjestu potrošnje i povećanje udjela energije iz obnovljivih izvora u ukupnoj potrošnji. Zakonom je definirano poticanje proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora energije tržišnom premijom (*engl. feed-in-premium*). Iznimno, moguće je poticanje proizvodnje električne energije dosadašnjim modelom subvencioniranja poticajnom cijenom (*engl. feed-in-tariff*), ali isključivo elektrana snage do 30 kW. Izvor sredstava za subvencioniranje i dalje ostaje naknada za obnovljive izvore energije koju plaćaju krajnji potrošači električne energije. U budućnosti se očekuje povećanje naknade kako bi se osiguralo dovoljno sredstava za subvencioniranje OIE. Trenutno najveći nedostatak predstavlja nepostojanje Pravilnika o OIEiVIK predviđenog zakonom čija je svrha dopuna zakona mnogim provedbenim detaljima, od kojih su najvažniji metodologija izračuna referentnih cijena i tržišnih premija za određene vrste i snage postrojenja. Premijski model poticanja donosi mnogobrojne novosti u sustav subvencioniranja, te investitoru osigurava samo određenu zaštitu od rizika tržišnih cijena. Prvi korak za dobivanje poticaja jest stjecanje statusa povlaštenog proizvođača energije od strane HROTE (Hrvatski operator tržišta energije). Sljedeća prepreka za proizvođače koji konkuriraju za dobivanje premije jest natječajni postupak u kojem se sukladno raspoloživim kvotama dodjeljuju premije najpovoljnijim ponuđačima najmanje jednom godišnje. Najpovoljnijim ponuđačem smatra se ponuđač koji ponudi najniži iznos referentne vrijednosti električne energije. Nadalje, proizvođač električne energije samostalno prodaje električnu energiju po tržišnoj cijeni, a premija mu se isplaćuje isključivo za prodanu energiju. Upravo samostalna prodaje energije na tržištu predstavlja potencijalni problem jer je potencijalnim investitorima proizvodnja i prodaja električne energije usputna djelatnost, te zahtijeva dodatne napore prilikom izlaska na tržište ili angažiranje posrednika. Poticaj se ne dodjeljuje za vrijeme negativnih tržišnih cijena. Veliki problem prilikom uspostavljanja ovog

modela predstavljaju i male kvote za poticanje OIE. Slika 6. prikazuje različite modele subvencioniranja proizvodnje električne energije i rizik koji modeli donose promjenom cijene energije na tržištu. S lijeve strane nalazi se model poticajnih cijena, a desno mogući modeli subvencioniranja tržišnom premijom. Zakonom je u Republici Hrvatskoj izabran model s promjenjivom (kliznom) premijom.



**Slika 6. Mogući modeli subvencioniranja prodaje električne energije [13]**

### 3.1. Način izračuna tržišne premije

Tržišna premija za svako pojedino proizvodno postrojenje ili proizvodnu jedinicu u obračunskom razdoblju (mjesečno) računa se prema izrazu (1):

$$Tp_i = RV - TC_i \quad (1)$$

Pri čemu su:

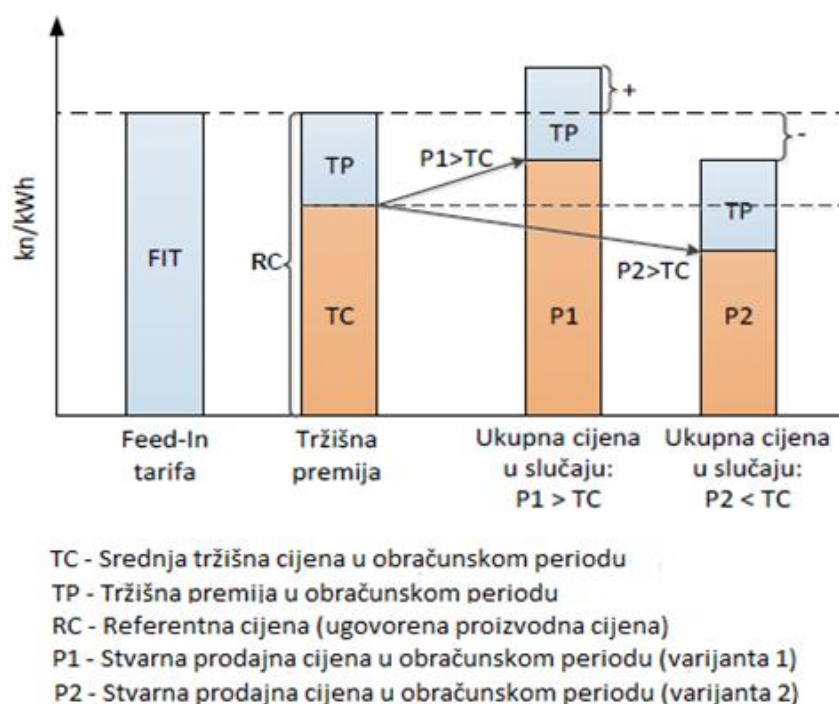
$Tp_i$  – tržišna premija za pojedino proizvodno postrojenje u obračunskom razdoblju [kn/kWh]

$RV$  – referentna vrijednost električne energije utvrđena ugovorom o tržišnoj premiji-natječajem [kn/kWh]

$TC_i$  – referentna tržišna cijena električne energije [kn/kWh]

Referentne tržišne cijene ( $TC_i$ ) određuje HROTE na mjesečnoj bazi, temeljem metodologije definirane Pravilnikom o korištenju OIEiVIK. U metodologiji će se uzeti u obzir dodatni operativni troškovi za uravnoteživanje sustava. Prije provođenja natječaja za subvencioniranje HROTE će temeljem metodologije izračunati i  $RV_{max}$  – maksimalne referentne cijene ovisno o vrstama, snagama i tehnologijama proizvodnih postrojenja. Iznos ugovorene referentne cijene s određenim proizvođačem se ne mijenja do isteka ugovora, izuzev korekcije zbog inflacije.

Referentna vrijednost ( $RV$ ) trebala bi se određivati temeljem tržišnih cijena na referentnom tržištu električne energije u razdoblju za koje se obračunava premija. Referentna vrijednost neovisna je o cijeni po kojoj je proizvođač prodao energiju. Referentne cijene za različite tehnologije se mogu, ali ne moraju razlikovati. Slika 7. prikazuje odnose feed-in tarife/poticajne cijene, referentne cijene i dvije varijante u kojima se može naći proizvođač električne energije.

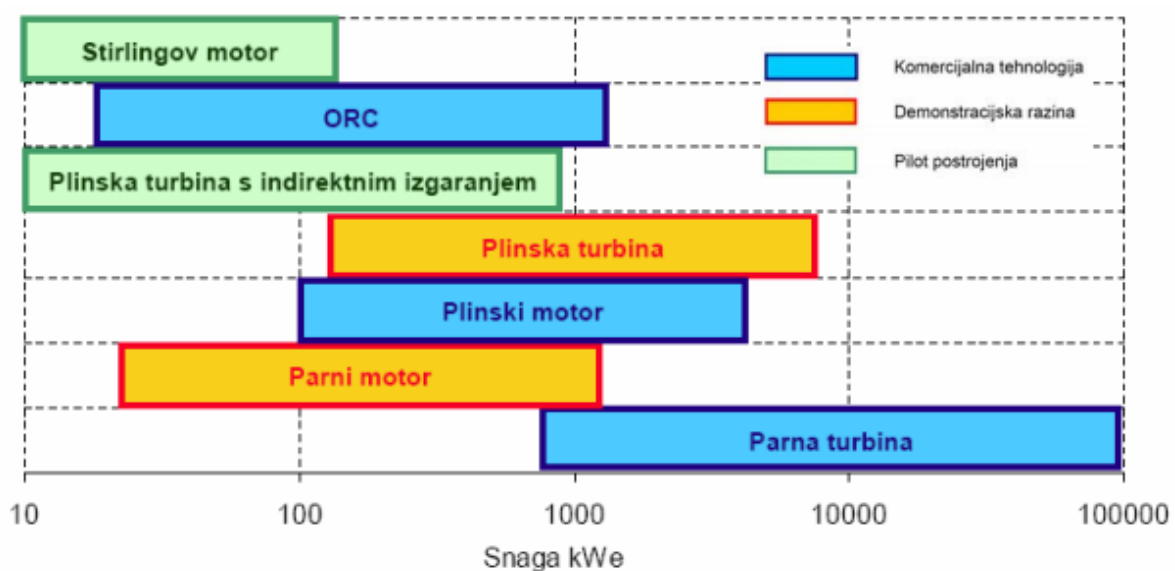


**Slika 7. Odnos poticajne, referentne i tržišne cijene [13]**

## 4. METODA

### 4.1. Tehnički proračun postrojenja

Vodeći se potrebama za električnom i toplinskom energijom, te stupnjem razvoja pojedine tehnologije kao najbolje tehničko rješenje ističe se ORC modul koji iskorištava toplinu razvijenu u kotlu za izgaranje krute biomase. Slika 8. u nastavku predstavlja grafički prikaz smjernica korištenih prilikom izbora tehničke izvedbe postrojenja. U scenarijima u nastavku koriste se kotao i ORC različitih nazivnih snaga kako bi zadovoljili potrebe za toplinskom energijom sušara i/ili CTS-a.

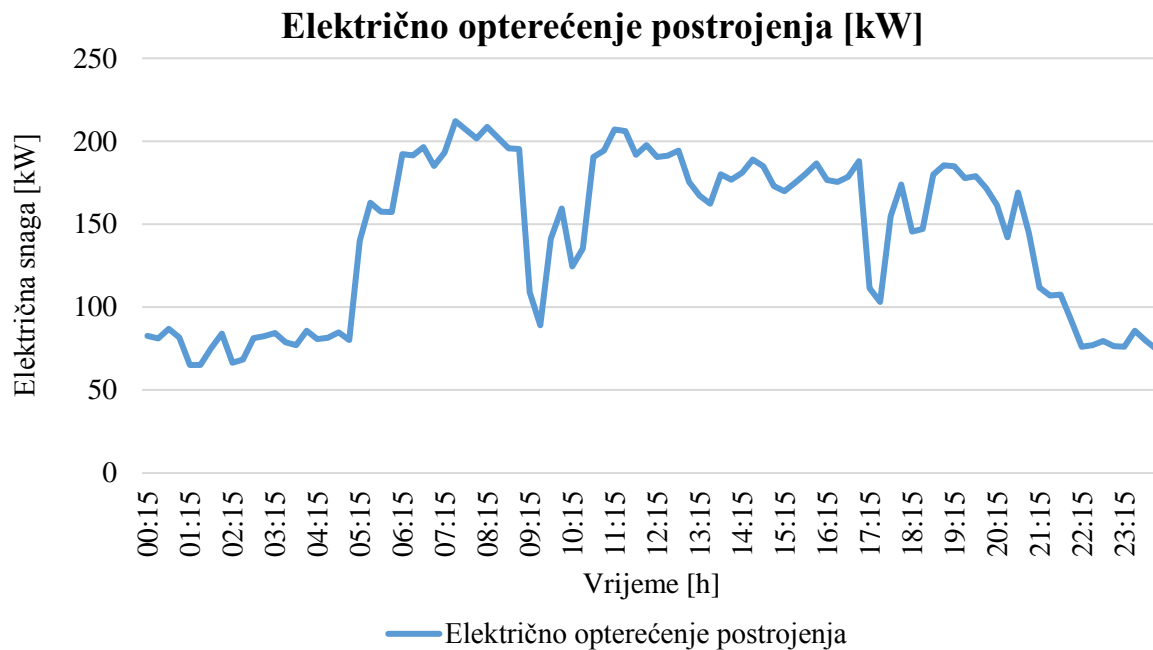


**Slika 8. Preporuke pri izboru tehnologije iskorištavanja biomase [3]**

#### 4.1.1. Proračun nazivnog električnog opterećenja i potrošnje električne energije pilane

Uvid u podatke o nazivnoj snazi u vremenu i ukupnoj potrošnji električne energije omogućio je investitor. Potrošnja električne energije pilane tijekom godine svedena je na nekoliko karakterističnih dana u tjednu. Izračunavanjem prosjeka navedenih vrijednosti dobiveni su podaci

o kretanjima snage i potrošnje električne energije tijekom radnog dana. U danima vikenda korišteno je nazivno opterećenje od 50 kWe. Slika 9. u nastavku prikazuje prosječno kretanje krivulje nazivne snage u vremenu od 00:00 do 24:00, pri čemu površina ispod krivulje predstavlja potrošnju električne energije tijekom radnog dana.



**Slika 9. Krivulja potrošnje električne energije tijekom radnog dana**

#### **4.1.2. Proračun toplinskog opterećenja i godišnje potrošnje toplinske energije pilane**

S obzirom na to da potrošnja topline u sušarama varira od 10-100% nazivne snage, prosječna potreba za topline sušara ( $Q_{ns}$ ) izračunata je na osnovu vrijednosti predloženih u literaturi [14]. Ukupna godišnja potrošnja toplinske energije za potrebe sušara računa se po izrazu (2) pri čemu vrijednost  $Q_s$  iznosi  $595 \text{ kWh/m}^3$

$$Q_{ns} = Q_s \cdot V_d \quad (2)$$

Pri čemu su:

$Q_{ns}$ – godišnja potrošnja topline [kWh/godišnje]

$Q_s$  – specifična potrošnja toplinske energije [kWh/m<sup>3</sup>]

$V_d$  – volumen drvene mase [m<sup>3</sup>/god]

Nazivno toplinsko opterećenje sušara (3) izračunato je na osnovu vrijednosti iz literature [14]:

$$\Phi_{ns} = 7,0 \cdot V_s \quad (3)$$

Pri čemu su:

$\Phi_{ns}$  – nazivna toplinska snaga sušare [kW]

$V_s$  – kapacitet sušare [m<sup>3</sup>]

#### **4.1.3. Mapiranje toplinskih potreba**

Mapiranje toplinskih potreba objekata u blizini kogeneracijskog postrojenja provedeno je koristeći se podacima iz [15] budući da nema podataka o toplinskoj potrošnji objekata u Krasnom polju gdje se nalazi postrojenje za koje se provodi analiza. Objekti su podijeljeni u kategorije prema stanju ovojnice zgrade, te im je sukladno kategoriji dodijeljena specifična potrošnja na godišnjoj razini -  $q_s$  svedena na kvadratni metar grijane površine, [kWh/god·m<sup>2</sup>]. Također je u obzir uzeta i visina građevina, točnije broj katova, pri čemu je grijano potkrovlje označeno kao 0,5 kata, a prilikom izračuna površine potkrovlja korištena je površina kata pomnožena s faktorom 0,75 [16]. Prilikom izračuna nazivne snage CTS-a korišten je orijentacijski postupak izračuna toplinskog opterećenja pojedine zgrade [2]. Formula za izračun toplinskog opterećenja dana je u nastavku (4):

$$\Phi_g = A_g \cdot q_s \cdot F_1 \quad (4)$$

Pri čemu su:

$\Phi_g$  – toplinsko opterećenje [kWh]

$A_g$  – grijana površina građevine [m<sup>2</sup>]

$q_s$  – specifična toplinska potrošnja [kWh/m<sup>2</sup>]

$F_1$  – faktor položaja zgrade

Vrijednost faktora  $F_1$  iznosi 0,7, a odnosi se na stambenu zgradu. U nastavku Tablica 3. prikazuje podjelu zgrada u kategorije te odgovarajuće iznose specifične potrošnje topline i specifične potrebe za toplotom.

**Tablica 3. Kategorizacija zgrada pri toplinskom mapiranju**

Kategorija	Specifična potrošnja [kWh/m <sup>2</sup> ·god]	Specifična potreba za toplotom [kW/m <sup>2</sup> ]
<b>Kuća s fasadom</b>	133	110
<b>Kuća bez fasade</b>	262,5	160
<b>Stambena zgrada</b>	161,25	91
<b>Industrijska</b>	100	60
<b>Zgrada javne namjene</b>	270	190

Prateći položaj objekata uz pomoć Geoportala izrađen je plan izgradnje toplovoda za 51 korisnika koliko ih je uključeno u toplinsko mapiranje. Kategorizaciju zgrada prikazuju Slika 10. i Slika 11. Na osnovu toplinskog opterećenja na pojedinoj dionici izvršen je odabir nazivnog promjera cjevovoda vodeći se katalogom proizvođača - Tablica 4. Korišten je temperaturni režim 80/60 °C, a cijevi su odabrane na osnovu maksimalnog toplinskog opterećenja pojedine dionice, tako da je odabran promjer cjevovoda kako bi iznos izračunatog protoka iznos bio što bliži iznosu protoka u katalogu (5), (6).

Vrijednost korištenog specifičnog toplinskog kapaciteta vode  $c_w$  iznosi 4,187 kJ/kgK, a vrijednost gustoće vode  $\rho_w$  iznosi 1000 kg/m<sup>3</sup>.

Proračun toplinskih gubitaka proveden je koristeći koeficijent  $K_{dr}$  kojeg prikazuje Tablica 4. i prosječnu srednju temperaturu  $\vartheta_s$  koja je jednaka aritmetičkoj sredini temperatura polaza i povrata temperaturnog režima 80/60. Formula (7) za izračun toplinskih gubitaka u pojedinoj grani cjevovoda dana je u nastavku.



$$q_{mw} = \frac{\Phi_T}{c_w (\vartheta_{pol} - \vartheta_{pov})} \quad (5)$$

$$q_v = \frac{q_{mw}}{\rho_w} \quad (6)$$

Pri čemu su:

$q_{mw}$  – maseni protok vode u pojedinoj grani [kg/s]

$\Phi_T$  – maksimalno toplinsko opterećenje grane [kW]

$c_w$  – specifični toplinski kapacitet vode [kJ/kgK]

$\vartheta_{pol}$  – temperatura polaza vode [°C]

$\vartheta_{pov}$  – temperatura povrata vode [°C]

$q_v$  – volumni protok vode [m<sup>3</sup>/s]

$\rho_w$  – gustoća vode [kg/m<sup>3</sup>]

**Tablica 4. Katalog predizoliranih cijevi tvrtke ISOPLUS [15]**

Tip	Dimenzioniranje				Gubitak topline	Cijena
	Sadržaj vode (l/m)	Volumni protok vode (m <sup>3</sup> /h)	Brzina strujanja (m/s)	Prenosiv učinak	koeficijent Kdr [W/(mK)]	
				20K		HRK
DN25	0,585	1,686	0,80	39	0,2745	340
DN32	1,018	3,298	0,90	77	0,2720	360
DN40	1,379	4,964	1,00	115	0,3037	400
DN50	2,282	9,036	1,10	210	0,3496	430
DN65	3,816	16,483	1,20	383	0,3522	490
DN80	5,346	25,017	1,30	582	0,3715	530
DN100	9,009	45,405	1,40	1.056	0,3913	650
DN125	13,789	79,423	1,60	1.847	0,4308	785
DN150	20,182	130,77	1,80	3.042	0,4691	1.095
DN200	31,4159	226,19	2,00	5.259	0,5379	1.325
DN250	49,0874	388,77	2,20	9.039	0,6066	1.670
DN300	70,6858	610,73	2,40	14.200	0,6754	2.054,78
DN350	96,2113	900,54	2,60	20938	0,7442	2439,56

$$\Phi_{Gi} = Kdr_i \cdot l_i \cdot \vartheta_s \quad (7)$$

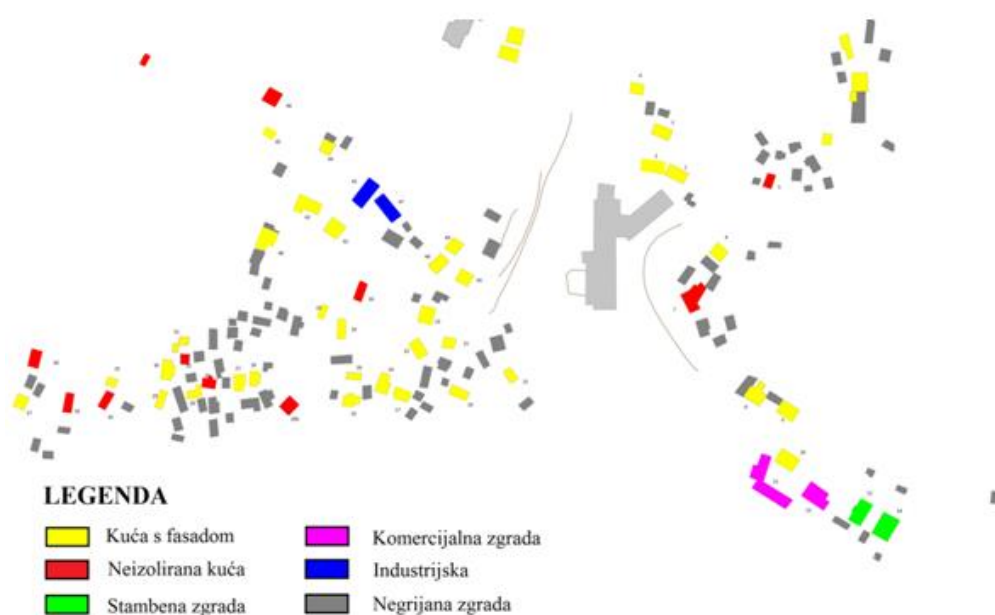
Pri čemu su:

$\Phi_{Gi}$  – toplinski gubitak grane cjevovoda [W]

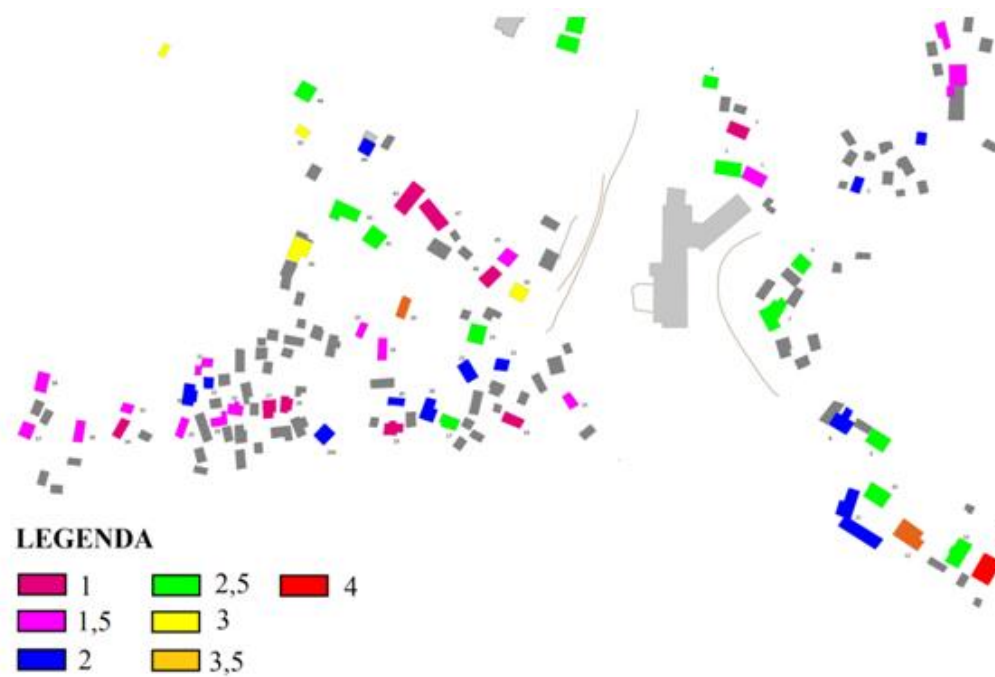
$Kdr_i$  – koeficijent gubitka [W/mK]

$l_i$  – duljina pojedine grane cjevovoda [m]

$\vartheta_s$  – srednja temperatura u cjevovodu [°C]



**Slika 10. Kategorizacija zgrada s obzirom na godišnju potrošnju toplinske energije**



**Slika 11. Kategorizacija građevina s obzirom na broj katova**

Ukupni toplinski gubici toplinskog sustava (8) jednaki su sumi gubitaka pojedinih grana:

$$\Phi_G = \sum \Phi_{Gi} \quad (8)$$

Pri čemu je:

$\Phi_{Gi}$  – toplinski gubitak grane cjevovoda [W]

$\Phi_G$  – ukupni toplinski gubitak

## 4.2. Ekonomska analiza postrojenja

### 4.2.1. Prihodi

U prihode se u pojedinim scenarijima uključuju:

- Prihod od uštede električne energije (iznos naknade za isporučenu energiju) (9)

$$P_u = E_u \cdot C_e \quad (9)$$

Pri čemu su:

$P_u$  – prihod od uštede električne energije [kn]

$E_u$  – ušteda električne energije [kWh]

$C_e$  – kupovna cijena električne energije [kn/kWh]

- Prihod od prodaje električne energije po tržišnoj cijeni (10)

$$P_p = \sum E_{ti} \cdot C_{tei} \quad (10)$$

Pri čemu su:

$P_p$  – prihod od prodaje električne energije na tržištu [kn]

$E_{ti}$  – količina prodane energije u i-tom satu [kWh]

$C_{tei}$  – tržišna cijena električne energije u i-tom satu [kn/kWh]

- Prihod od tržišne premije (11)

$$P_{tp}=T_{pi} \cdot E_{ti} \quad (11)$$

Pri čemu su:

$P_{tp}$  – prihod od tržišne premije [kn]

$T_{pi}$  – iznos tržišne premije [kn/MWh]

$E_{ti}$  – količina prodane električne energije [MWh]

- Prihod od povećanje vrijednosti sušene drvene mase (12)

$$P_{dm}=V_s \cdot C_d \quad (12)$$

Pri čemu su:

$P_{dm}$  – prihod od povećanja vrijednosti drvene mase [kn]

$V_s$  – volumen osušene drvene mase [m<sup>3</sup>]

$C_d$  – specifično povećanje vrijednosti osušene drvene mase [kn/m<sup>3</sup>]

- Naknada za ugovorenu toplinsku snagu korisnika spojenih na CTS (13)

$$P_n=\sum C_n \cdot \Phi_{ni} \quad (13)$$

Pri čemu su:

$P_n$  – prihod od naknade za osiguranu snagu [kn]

$C_n$  – tarifna stavka snaga [kn/kW]

$\Phi_{ni}$  – potrošnja toplinske energije pojedinog potrošača [kW]

- Naknada za isporučenu toplinsku energiju – CTS (14)

$$P_q=\sum C_q \cdot Q_{ni} \quad (14)$$

Pri čemu su:

$P_q$  – prihod od naknade za isporučenu toplinsku energiju [kn]

$C_q$  – tarifna stavka toplina [kn/kWh]

$Q_{ni}$  – isporučena toplina [kWh]

U tehno-ekonomskoj analizi scenarija prihodi dolaze u vidu uštede električne energije pri čemu se u obzir uzima dio kupovne cijene koji se odnosi na potrošnju električne energije, dok se iznos koji se izdvaja za osiguravanje snage ne uzima u obzir budući da je realno očekivati prekide u radu postrojenja. Nadalje, prihod se ostvaruje od prodaje električne energije po tržišnoj cijeni, a u scenarijima u kojima je uključeno poticanje tržišnom premijom prihod se uvećava za iznos tržišne premije. U pogledu korištenja toplinske energije prihod čini povećanje vrijednosti drvene mase nakon sušenja, a u scenariju s CTS-om naknada za snagu i isporučenu toplinsku energiju.

#### **4.2.2. Rashodi**

Troškovi postrojenja koji se pojavljuju su:

- Investicijski troškovi (troškovi ugradnje kotla, ORC-a, CTS-a i dodatnih kapaciteta sušara)
- Tržišna vrijednost utrošene otpadne biomase (potencijalni investitor je trenutno u mogućnosti prodavati otpadnu biomasu po cijeni od 25 €/t)
- Troškovi održavanja postrojenja
- Troškovi amortizacije
- Troškovi poreza na dobit
- Trošak nabave otpadne biomase (u scenarijima u kojima se iskorištava sva otpadna biomasa potrebno je kupovati dodatne količine po tržišnim cijenama)

Troškovi zaposlenih nisu uračunati budući da su već zaposleni radnici čiji je zadatak upravljanje sušarama, osim u scenariju koji uključuje CTS.

### 4.3. Izračun investicijskog troška izgradnje ORC postrojenja

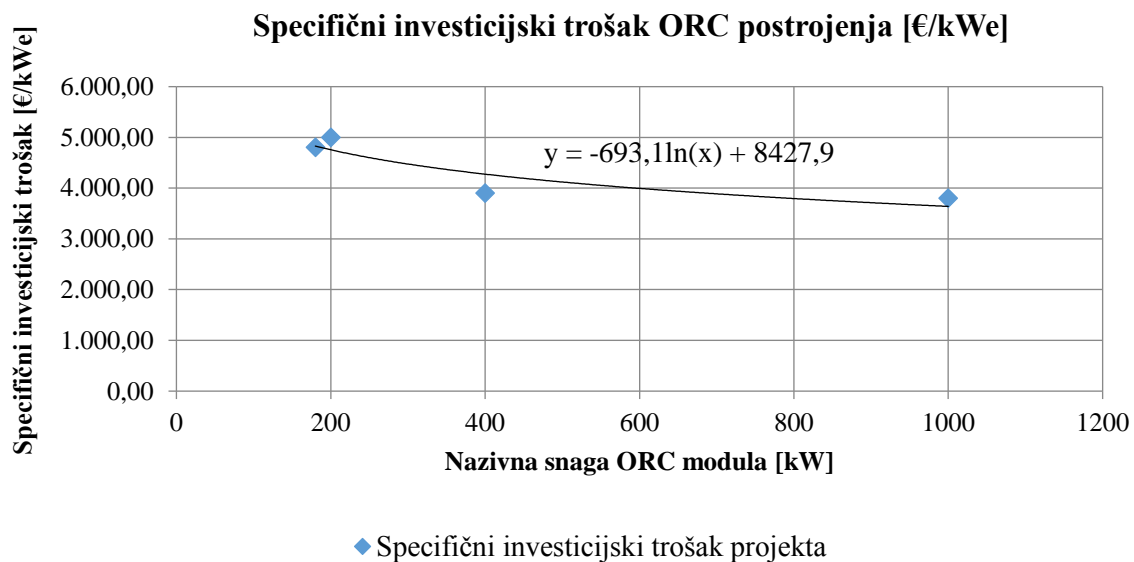
Iznos specifičnog investicijskog troška ORC postrojenja proveden je koristeći se podacima iz literature koji čine sintezu podataka o specifičnom trošku iz postojeće literature [17]. Prilikom interpolacije cijene korišteni su specifični investicijski troškovi postrojenja čija je snaga podjednaka snazi postrojenja korištenih u ovome radu. Cijene su izražene po kW električne snage i odnose se na trošak izgradnje ORC postrojenja na biomasu. Postojeći podaci uneseni su u Excel te je uz pomoć softvera određena logaritamska funkcija koja interpolira postojeće točke. Jednadžba funkcije (15) kojom su određene cijene za nazivne snage modula i odgovarajući dijagram kojeg prikazuje Slika 12. dani su u nastavku.

$$C_{orc} = -693 \cdot \ln(P_{el}) + 8428 \quad (15)$$

Pri čemu su:

$C_{orc}$  – specifična cijena ORC postrojenja [€/kWe]

$P_{el}$  – nazivna snaga ORC postrojenja [kW]



**Slika 12. Specifični investicijski trošak ORC postrojenja**

#### 4.4. Izračun investicijskog troška izgradnje CTS-a

Proračun visine investicije u CTS također je proveden koristeći se katalogom kojeg prikazuje Tablica 4. Iznos investicije u cjevovod izračunat je na osnovu poznatih duljina pojedinih dionica i odgovarajuće cijene u katalogu. Za troškove projektne dokumentacije preuzet je iznos od 122.000 kn te iznos ostalih troškova od 96.000 kn iz [17]. Izgradnja toplinskih podstanica nije uključena u cijenu, kao ni trošak kotlovnice i objekata koji su sastavni dio kogeneracijskog postrojenja. Godišnji trošak zaposlenika uzet je u iznosu od 180.000 kn [18], a trošak održavanja uračunat je kao 1% ukupne investicije u čitavo postrojenje.

#### 4.5. Bioheat Profitability Assessment Tool

*Bioheat Profitability Assessment Tool* besplatan je alat kojega je razvila Austrijska energetska agencija. Namijenjen je korisnicima koji imaju određena znanja u području sustava grijanja na biomasu. Alat ima veliki potencijal upotrebe i omogućava korisniku provođenje preliminarne tehno-ekonomske analize. Područje primjene alata je grijanje u pojedinačnim kućama, ali i centraliziranim toplinskim sustavima. Alat pruža pomoć prilikom dimenzioniranja postrojenja, koristeći referentne cijene na osnovu izgrađenih projekata, te izračunava pogonske troškove, troškove održavanja itd. Alat se sastoji od pojedinačnih alata u obliku tablica u Excelu, a to su; alat za proračun parametara goriva i alat za dimenzioniranje postrojenja i proračun isplativosti projekta [19].

##### 4.5.1. Wood Fuel Parameters Tool

Alat za proračun parametara goriva vrlo je jednostavan za korištenje pri čemu se podaci unose u jasno označene crvene ćelije. Unošenjem nekoliko osnovnih parametara goriva na raspolaganju kao što su vrsta goriva (ogrjevno drvo, sječka, kora, slama i sl.), vrsta drva (jela, bukva, grab...), postotka vlažnosti i na osnovu tražene količine topline na izlazu iz kotla alat proračunava godišnji utrošak goriva u tonama, kubnim metrima i sl. Alat daje i podatke o ogrjevnoj vrijednosti svedenoj na kilogram goriva kao i na kubni metar. Unošenjem nabavne cijene dobiva se i informacija o cijeni goriva godišnje, kao i specifičnoj cijeni goriva svedenoj na 1 MWh korisne toplinske



energije. Alat daje i podatke o količini pepela. U ovom radu je korišten je alat za proračun parametara goriva te su rezultati uspoređeni s vrijednostima korištenima u proračunu. Slika 13. prikazuje rezultate godišnjih troškova goriva za primjer dan u alatu.

<b>Installation parameters</b>	Fuel demand per year	MWh/a	<b>24.500</b>
	Fuel ratio	%	<b>100%</b>
	Fuel volume	m <sup>3</sup> FS /a	<b>29.096</b>
	Fuel weight	t DM /a	<b>5.261</b>
	Fuel weight	t FS /a	<b>8.958</b>
	Ash weight (estimate)	t /a	<b>129</b>
	Ash volume (estimate)	m <sup>3</sup> /a	<b>185</b>
	Fuel costs per year	<b>Euro/a</b>	<b>426.300</b>
	Composite fuel price	<b>Euro/MWh</b>	<b>17,40</b>

**Slika 13. Rezultati proračuna parametara goriva**

#### **4.5.2. Plant Dimensioning Tool**

Alat za dimenzioniranje postrojenja također je vrlo jednostavan i korisniku omogućuje okvirni uvid u veličinu postrojenja i troškove goriva tijekom godine. On zahtijeva unosenje podataka o lokaciji, ali i o trenutnom kotlu kojega koristi kao što su; stupanj djelovanja, vrsta i potrošnja goriva. Potrebno je unijeti i podatke o potrošnji toplinske energije na godišnjoj razini ili podatke o stanju izolacije zgrade, kvadraturi i broju osoba na osnovu čega se izračunava nazivna snaga sustava grijanja. S obzirom na to da je svrha ovoga alata izrada okvirnog proračuna snage i troškova zamjene postojećeg kotla, kao i potencijalnih ušteda prilikom zamjene kotla na fosilna goriva kotlom na biomasu nije prilagođen za rješavanje scenarija koji su obrađeni ovim radom. Unatoč tome alat nudi mogućnost izračuna određenih parametara koji su korišteni u ovom proračunu pa je dana usporedba vrijednosti izračunatih ovim radom i dobivenih unosenjem podataka u alat za dimenzioniranje.

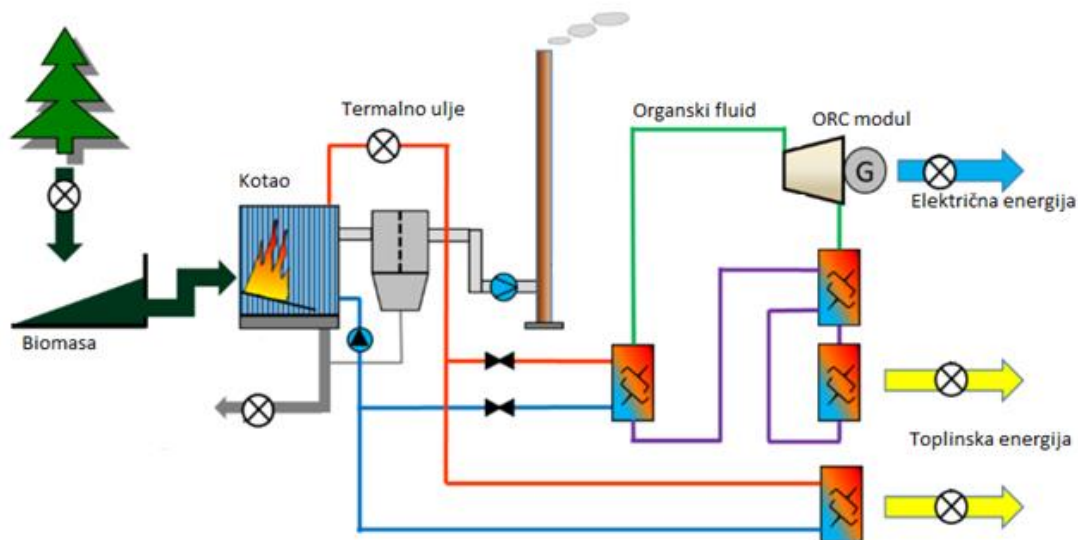
## 5. ANALIZA SLUČAJA

Pilana Krasno smještena je u središtu istoimenog podvelebitskog naselja, u blizini Otočca. Nalazi se na 714 m nadmorske visine. Srednje veliko poduzeće predstavlja vrlo važan gospodarski subjekt općine Krasno Polje s godišnjim prihodima oko 22.000.000 kn. Osnovne djelatnosti pilane su proizvodnja i prodaja piljene građe, šumarstvo, sječa drva i usluge povezane s njima kao što su proizvodnja biomase i goriva, te posredovanje na domaćem i inozemnom tržištu [20].

Kako bi se istražila isplativost investiranja u kogeneracijsko postrojenje u nastavku su predložena četiri scenarija u kojima se uvode određeni tehnički parametri i ispituju različiti modeli korištenja i prodaje električne i toplinske energije.

### 5.1. Scenarij 1

U Scenarij 1 ugrađen je kotao nazivne snage 3.000 kWt. Neto snaga ORC-a priključenog na kotao iznosi 500 kWe i 2.200 kWt. Proces se vodi 8.000 h godišnje nazivnom snagom. Jednu od mogućih tehničkih izvedbi prikazuje Slika 14. u nastavku.

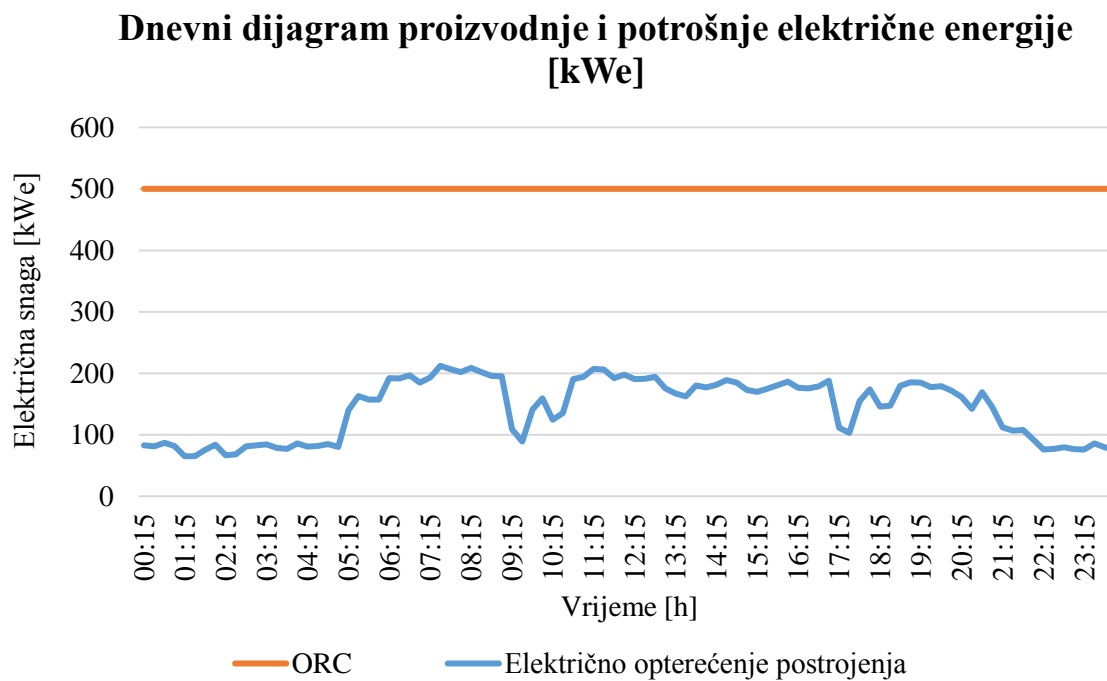


Slika 14. Shema moguće izvedbe postrojenja

ORC-om se zadovoljavaju potrebe za električnom energijom, a višak se prodaje na tržištu. U ovome scenariju toplinska energija zadovoljava potrebe sušara, a višak toplinske energije se odvodi sekundarnim sustavom hlađenja ORC modula. Nazivni kapaciteti sušara iznose  $200 \text{ m}^3$  drvene građe. To omogućava sušenje  $5.500 \text{ m}^3$  godišnje što iznosi  $3.300 \text{ m}^3$  više u odnosu na sadašnje kapacitete. Pretpostavlja se da proizvođač uspijeva prodati svu električnu energiju po važećim tržišnim cijenama. Izračun prihoda ostvarenog prodajom električne energije na tržištu proveden je na satnoj razini pri čemu su uzete cijene električne energije na slovenskom tržištu iz 2016. godine [22]. Količine raspoložive energije za prodaju na tržištu izračunate su kao razlika nazivne snage ORC-a i krivulje potrošnje na satnoj razini. Dnevna krivulja potrošnje električne energije svedena je na karakterističnu krivulju potrošnje čiji je tijek prosječna potrošnje na nekoliko karakterističnih radnih dana tijekom godine sukladno objašnjenju u metodi. Slika 15. prikazuje prosječni radni dan pri čemu plava linija predstavlja utrošak energije u vlastitom pogonu, a crvena linija proizvodnju energije na ORC-u. U neradnim danima uzeta je vrijednost vlastite snage električne energije od 50 kW, dok je ostatak raspoloživ za prodaju na tržištu. Prilikom izračuna visine investicije specifična cijena postrojenja s troškovima izgradnje uzeta je 4.054 €/kWe.

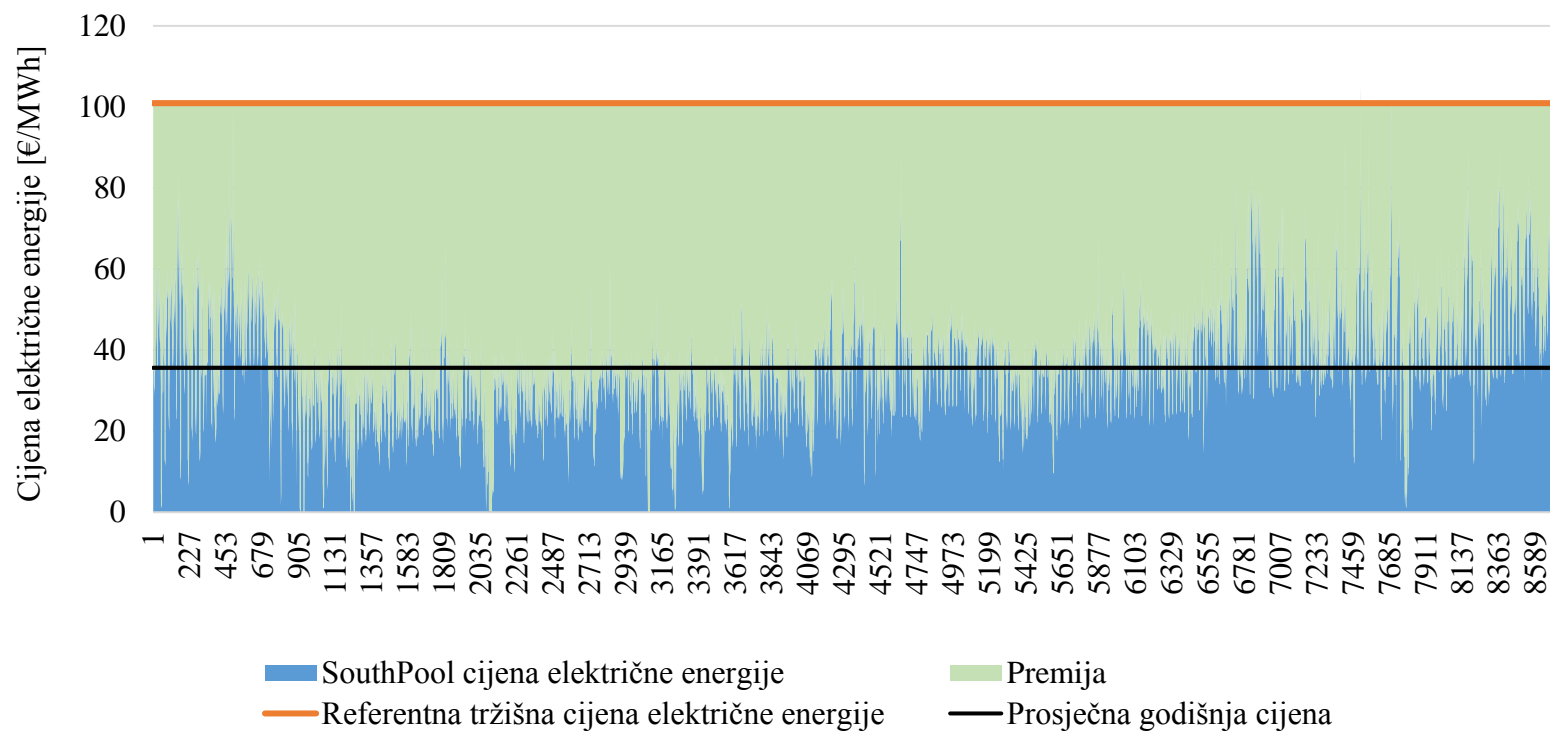
## 5.2. Scenarij 2

Scenarij 2 obrađuje slučaj u kojem bi vlasnik pilane sklopio ugovor o subvencioniranju proizvodnje električne energije po modelu s promjenjivom premijom. Scenarij 2 je u tehničkoj izvedbi jednak Scenariju 1. U pogledu prodaje električne energije pretpostavlja se da proizvođač uspijeva prodati svu proizvedenu električnu energiju po tržišnoj cijeni. Osim iznosa tržišne cijene proizvođaču se na mjesečnoj bazi isplaćuje i iznos klizne premije. Referentna tržišna cijena postavljena je na 100,9 €/MWh što je unutar granica njemačkih referentnih cijena [23], a ujedno iznosi 65% referentne cijene za ovaj tip postrojenja sukladno dosadašnjem modelu subvencioniranja. Potrebe za električnom energijom pilane zadovoljavaju se energijom iz mreže. Slika 16. prikazuje satno kretanje cijena električne energije na tržištu u usporedbi s referentnom vrijednošću u periodu od godinu dana. Investicijski trošak izgradnje postrojenja identičan je onome u Scenariju 1.



**Slika 15. Dnevni dijagram proizvodnje i potrošnje električne energije**

### Cijena električne energije [€/MWh]



**Slika 16. Dijagram kretanja tržišne cijene u odnosu na referentnu cijenu**

### 5.3. Scenarij 3

Scenarij 3 se u tehničkoj izvedbi u odnosu na prethodne scenarije razlikuje po nazivnim snagama kotla i ORC modula. U njemu je ugrađen kotao nazivne snage 5 MWt na kojega je spojen ORC modul neto električne snage 810 kWe i toplinske snage 3.600 kWt. Dio toplinske energije koristi se za zadovoljavanje potreba sušara, a dio se odvodi u okoliš. Kapacitet sušara je udvostručen te iznosi 400 m<sup>2</sup> što omogućava sušenje 11.000 m<sup>3</sup> drvene građe godišnje što je 8.800 m<sup>3</sup> više nego u sadašnjem stanju. Slika 17. prikazuje tipičan izgled sušare za drvo. U ovome scenariju prodaja električne energije je također subvencionirana tržišnom premijom, a način izračuna dobiti od prodaje električne energije istovjetan je Scenariju 2. Investicijski trošak u ORC postrojenje iznosi 3.712 €/kWe, a u sušare je fiksna te iznosi 840.000 kn.



**Slika 17. Sušare za drvo**

### 5.4. Scenarij 4

Nazivna snaga kotla i ORC postrojenja istovjetna je Scenariju 4, ali se višak toplinske energije uz iskorištavanje u sušarama nazivnog kapaciteta 200 m<sup>2</sup> iskorištava i za potrebe grijanja objekata u blizini proizvodnog postrojenja. Pri tome se u ekonomskoj analizi pojavljuje dodatni rashod u vidu investicije u toplinsku mrežu centraliziranog toplinskog sustava, a s druge strane pojavljuje se dodatni prihod u vidu naknade za ugovorenu toplinsku snagu, te za isporučenu toplinsku energiju.

Cijene toplinske energije uzete su iz cjenika Hrvatske elektroprivrede – sektor toplinarstvo za grad Osijek. [24], a iznose 8,43 kn/kW ugovorene snage i 0,16 kn/kWh isporučene toplinske energije.

Tablica 5. u nastavku donosi sažeti prikaz ulaznih parametara, a osnovne postavke i ulazne vrijednosti korištene u pojedinim scenarijima prikazuje Tablica 6.

**Tablica 5. Sažeti prikaz tehničkih i ekonomskih parametara postrojenja u scenarijima**

	Scenarij 1	Scenarij 2	Scenarij 3	Scenarij 4
<b>Nazivna snaga kotla</b>	3.000	3.000	5.000	5.000
<b>ORC električna snaga</b>	550	550	900	900
<b>ORC neto električna snaga</b>	500	500	810	810
<b>ORC toplinska snaga</b>	2.200	2.200	3.600	3.600
<b>Prodaja električne energije na tržištu</b>	Višak	Da	Da	Da
<b>Prodaja toplinske energije - CTS</b>	-	-	-	Da
<b>Subvencioniranje premijom</b>	-	Da	Da	Da
<b>Specifični investicijski trošak ORC [€/kWe]</b>	4.054	4.054	3.712	3.712.
<b>Povećanje kapaciteta sušara [m<sup>3</sup>/god]</b>	3.300	3.300	8.800	3.300

**Tablica 6. Osnovni ulazni parametri**

<b>Tehnički parametri</b>	
Ogrjevna vrijednost biomase [kWh/kg]	3,5
Gustoća biomase [kg/m <sup>3</sup> ]	295
Raspoloživa količina biomase [t]	10.000
Radni sati postrojenja [h]	8.000
Trenutni kapacitet sušara [m <sup>3</sup> ]	200
Vršno toplinsko opterećenje sušara [kW]	2.200
<b>Ekonomski parametri</b>	

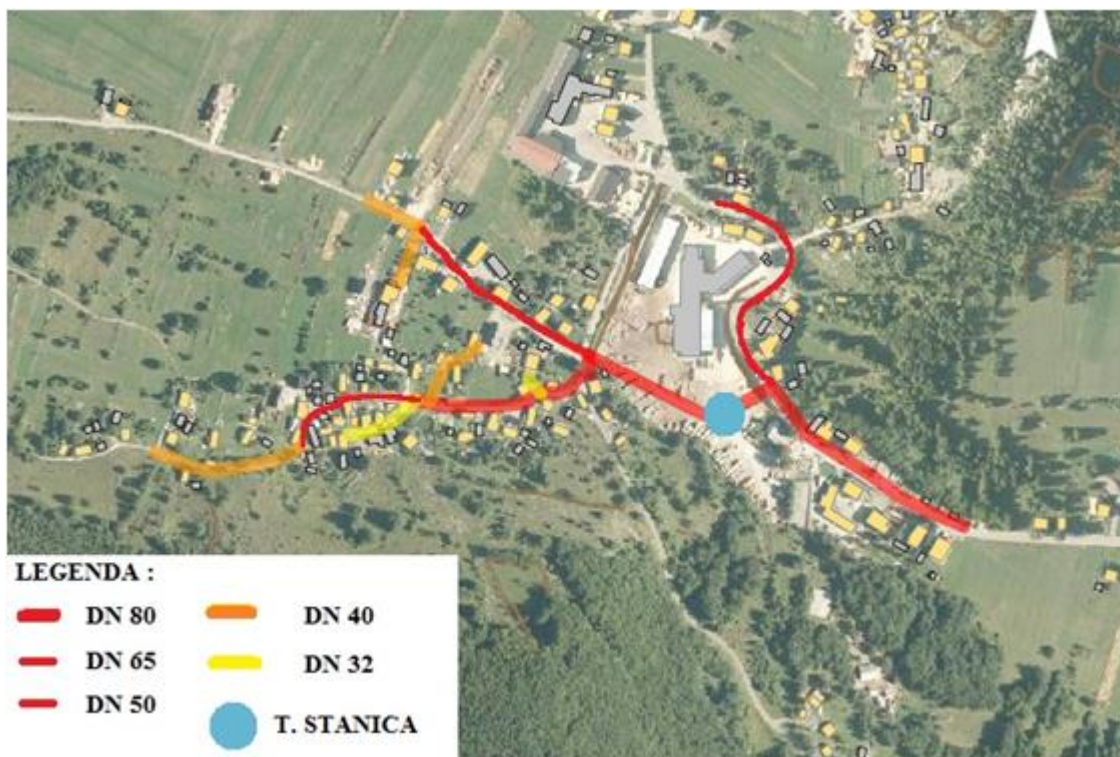
Cijena otpadne biomase [€/t]	25
Kupovna cijena otpadne biomase [€/t]	35
Dodana vrijednost sušenjem drvene mase [€/t]	50
Cijena toplinske energije – tarifa snaga [kn/kW]	8,43
Cijena toplinske energije – tarifa potrošnja [kn/kWh]	0,16
Trajanje projekta [god]	10
Kamatna stopa - kredit banke [%]	4,7
Nominalna diskontna stopa [%]	6
Amortizacija opreme [% investicije/god]	6,67
Amortizacija građevina [% investicije/god]	5
Porez na dobit [%]	20%
Vlastita sredstva na raspolaganju [kn]	5,100.000



## 6. REZULTATI

### 6.1. Rezultati mapiranja toplinskih potreba i projektiranja CTS-a

Slika 18. u nastavku prikazuje mrežu CTS-a s odgovarajućim cijevnim razvodom dobivenim na temelju proračuna.

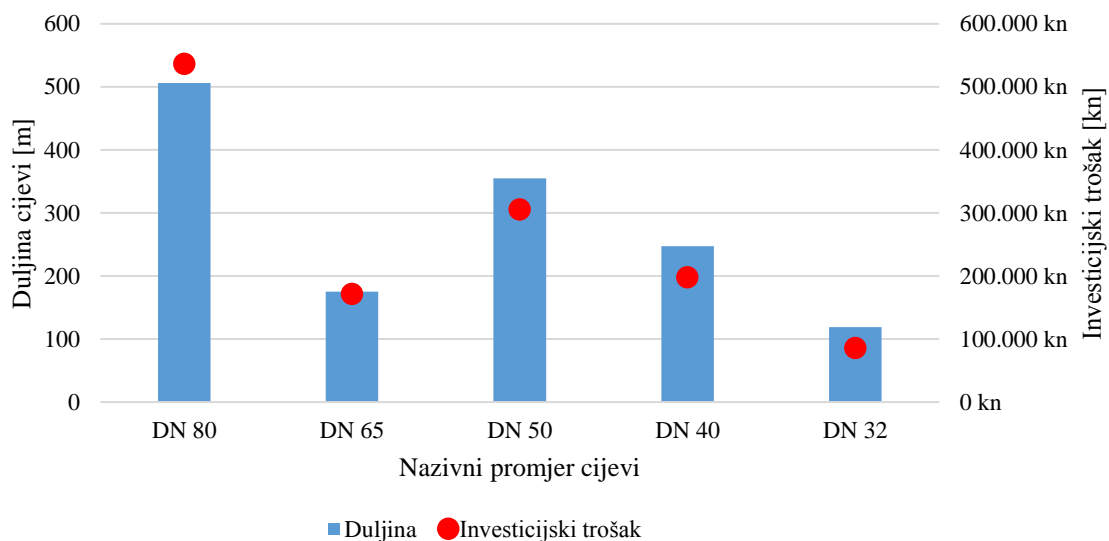


**Slika 18. CTS Krasno**

Ukupna duljina cjevovoda iznosi 2.804 m, a ukupni investicijski trošak u cjevovod iznosi 1.296.440 kn. Slika 19. prikazuje duljinu cijevnog razvoda cijevi određenog promjera, te pripadajući investicijski trošak. Rezultati linearne gustoće vršnog toplinskog opterećenja od 0,57 kW/m i linearne gustoće toplinske potrošnje od 803,65 kWh/m su vrlo mali, te su sukladni očekivanjima s obzirom na lokaciju postrojenja. Vrlo mala gustoća toplinske potrošnje iziskuje relativno dug cjevovod koji povlači visoke investicijske troškove u odnosu na toplinske potrebe.

U svrhu lakšeg snalaženja Tablica 7. daje pregledni prikaz najvažnijih rezultata tehno-ekonomske analize CTS-a.

### Raspodjela investicijskog troška u cjevovod



**Slika 19. Raspodjela investicijskog troška u cjevovod**

**Tablica 7. Zbirni prikaz rezultata proračuna CTS-a**

Vršno toplinsko opterećenje [kW]	1.595
Gubitci [kW]	67,40
Godišnja potrošnja topline [MWh]	2.253
Maksimalni teorijski gubitci [MWh]	472
Duljina cjevovoda [m]	2.804
Ukupna površina objekata [m <sup>2</sup> ]	13.405
Prosječna potrošnja topline [kWh/m <sup>2</sup> ]	168,10
Linearna gustoća vršnog toplinskog opterećenja [kW/m]	0,57
Linearna gustoća toplinske energije [kWh/m]	803,65
Investicija u cjevovod [kn]	1,296.440

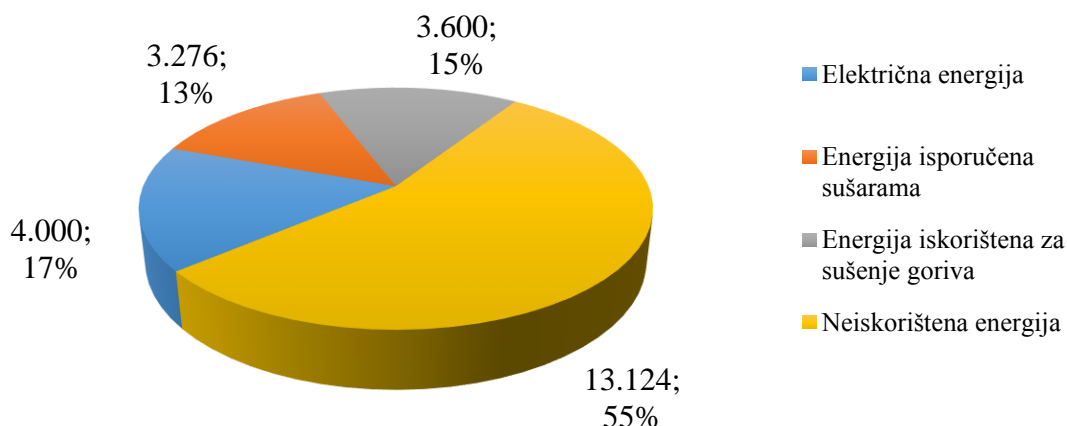
Projektna dokumentacija [kn]	122.000
Ostali troškovi [kn]	96.000
Ukupna investicija [kn]	1,514.440
Trošak zaposlenika [kn/god]	180.000

## 6.2. Rezultati tehno-ekonomske analize kogeneracijskog postrojenja

### 6.2.1. Scenarij 1

Tehničkom analizom Scenarija 1 utvrđeno je da ukupna iskoristivost biomase iznosi 45%. Raspodjelu korisne energije prikazuje Slika 20. Vidljivo je kako je količina neiskorištene energije veća od 50%. Osnovni razlog je činjenica da je prilikom analize pretpostavljen rad postrojenja 8.000 h nazivnom snagom. Nominalna snaga postrojenja određena je tako da zadovoljava vršno opterećenje sušara zbog čega se javlja velika količina neiskorištene energije. U praksi je moguć rad postrojenja pri manjim opterećenjima. Zbog karakteristike ORC-a da ostvaruje relativno visoku električnu iskoristivost pri manjim opterećenjima može se očekivati relativno visoka električna iskoristivost uz smanjenu potrošnju goriva, te postizanje većeg stupnja iskoristivosti. Također je otvorena i mogućnost poboljšanja iskoristivosti procesa ugradnjom dodatnih potrošača topline kao što su sušare ili grijanje objekata u blizini postrojenja. Pri tome bi u analizu obvezno trebalo uključiti dinamiku sustava kako bi se osigurala neometana opskrba potrošača topline u svakom trenutku. Nadalje, postoji i mogućnost izgradnje toplinskog spremnika kao rezerve toplinske energije. Rezultate tehno-ekonomske analize Scenarija 1 prikazuje Tablica 8.

### Raspodjela korištenja energije u Scenariju 1 [MWh]



**Slika 20. Raspodjela korištenja energije u Scenariju 1**

Scenarij 1 u periodu od deset godina ne donosi dobit, pri čemu NPV iznosi -10.268.300 kn tj. projekt donosi gubitak od 8.690.860 kn. Iz rezultata je vidljivo da je ulaganje u kogeneracijsko postrojenje na biomasu bez sklapanja ugovora o subvencioniranju prodaje električne energije na tržištu neisplativo unatoč korištenju električne i toplinske energije. Ukupni prihodi od 830.914 kn godišnje nisu dovoljni za pokrivanje visoke investicije iznosa 17.000.000 kn te diskontirani period povrata iznosi 23 god. Osnovni razlozi neisplativosti projekta su visoka cijena investicije, ali i otpadne biomase, te niska tržišna cijena električne energije. U slučaju financiranja projekta nepovratnim sredstvima [25] iznos nepovratnih sredstava morao bi iznositi 55% da bi projekt nakon 10 godina vratio uložena sredstva pri jednostavnom povratu novca. Samim time, da bi ovaj projekt bio isplativ morao bi i dalje konkurirati za ugovaranje tržišne premije.

**Tablica 8. Rezultati tehno-ekonomske analize Scenarija 1**

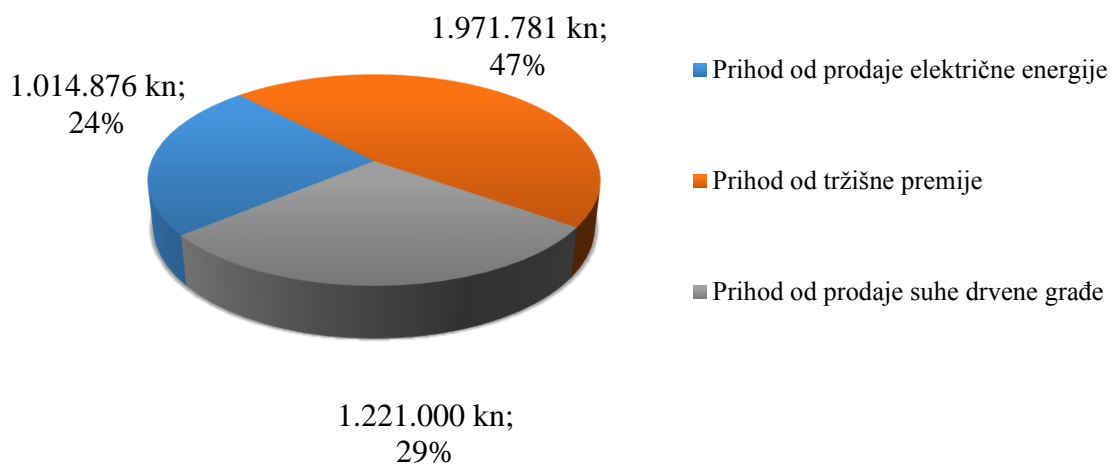
Proizvodnja električne energije [MWh/god]	4.000
Vlastita potrošnja električne energije [MWh/god]	933
Prodaja električne energije [MWh/god]	3.067
Proizvodnja topline [MWh/god]	17.600
Toplina iskorištena za sušenje drva [MWh/god]	3.276

Toplina iskorištena za sušenje goriva [MWh/god]	3600
Potrošnja biomase [t/god]	6.857
Ukupni stupanj djelovanja [%]	45%
Prihod od uštede električne energije [kn/god]	233.349
Prihod od prodaje električne energije [kn/god]	776.068
Prihod od sušenja građe [kn/god]	1,221.000
Troškovi goriva [kn/god]	1,268.571
Održavanje [kn/god]	130.931
Ukupno [kn/god]	830.914
Investicija [kn]	17,000.000
IRR [%]	-11
NPV [kn]	-10,268.300
Diskontirani period povrata [god]	23

### 6.2.2. Scenarij 2

Rezultati tehničke analize Scenarija 2 istovjetni su onima iz Scenarija 1. Iz ekonomske analize vidljivo je da je ulaganje u kogeneracijsko postrojenje na biomasu isplativo ako je prodaja električne energije subvencionirana tržišnom premijom. Stopa povrata iznosi 8% što je iznos veći od nominalne diskontne stope te opravdava ulaganje u ovakav projekt. Godišnji prihodi iznose 4,207.657 kn, od čega najveći dio otpada na prihod od tržišne premije. Ukupni godišnji prihod iznosi 2,802.240. U svrhu lakšeg snalaženja grafički prikaz prihoda u Scenariju 2 prikazuje Slika 21. Rezultate tehnno-ekonomske analize Scenarija 2 prikazuje Tablica 9.

### Raspodjela prihoda u Scenariju 2 [kn]



**Slika 21. Raspodjela prihoda u Scenariju 2**

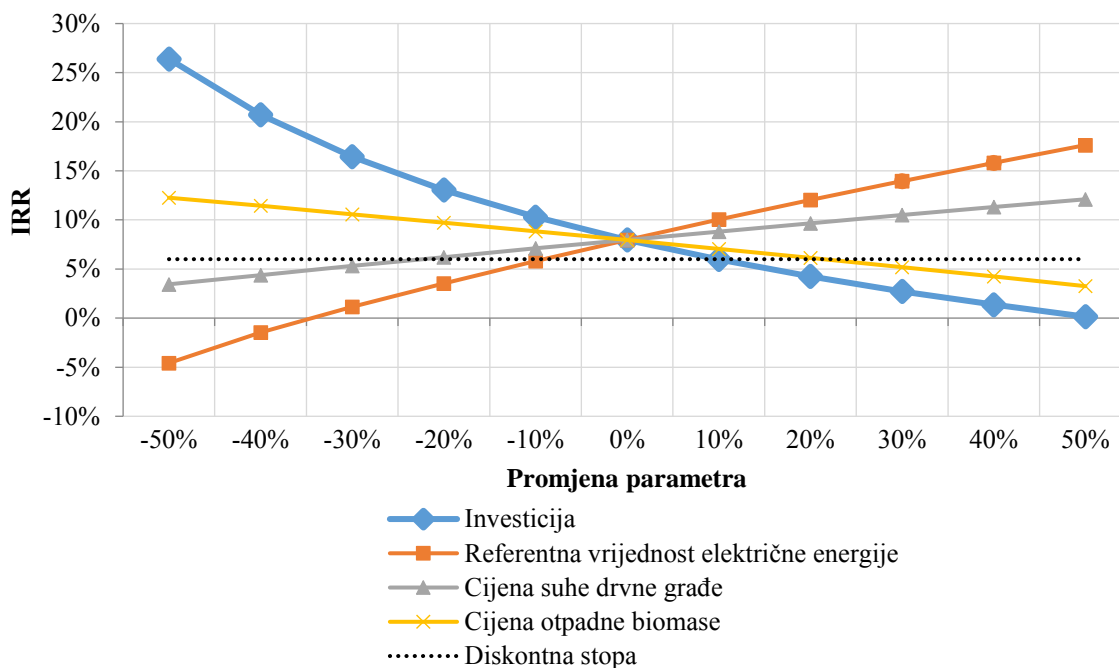
**Tablica 9. Rezultati tehno-ekonomske analize Scenarija 2**

Proizvodnja električne energije [MWh/god]	4.000
Prodaja električne energije [MWh/god]	4.000
Proizvodnja topline [MWh/god]	17.600
Toplina iskorištena za sušenje drva [MWh/god]	3.276
Toplina iskorištena za sušenje goriva [MWh/god]	3.600
Potrošnja biomase [t/god]	6.857
Ukupni stupanj djelovanja [%]	45%
Prihod od prodaje električne [kn/god]	1,014.876
Prihod od tržišne premije [kn/god]	1,971.781
Prihod od sušenja građe [kn/god]	1,221.000
Troškovi goriva [kn/god]	1,268.571
Održavanje [kn/god]	130.931
Ukupno [kn/god]	2,802.240
Investicija [kn]	17,000.000

IRR [%]	8
NPV [kn]	1.515.998
Diskontirani period povrata [god]	7,5

Slika 22. u nastavku prikazuje analizu osjetljivosti Scenarija 2 na promjenu ulaznih parametara kao što su visina investicije, cijena otpadne biomase (goriva), cijena osušene drvene građe i referentna vrijednost električne energije. Iz analize osjetljivosti uočljivo je da najveći utjecaj na ekonomsku isplativost projekta ima visina investicije. Drugi vrlo utjecajan parametar je referentna vrijednost električne energije što je i očekivano s obzirom na njen visoki udio u ukupnim prihodima. Promjene cijene suhe drvene građe i otpadne biomase imaju nešto blaži utjecaj na isplativost projekta.

### Analiza osjetljivosti Scenarija 2



**Slika 22. Analiza osjetljivosti Scenarija 2**

### 6.2.3. Scenarij 3

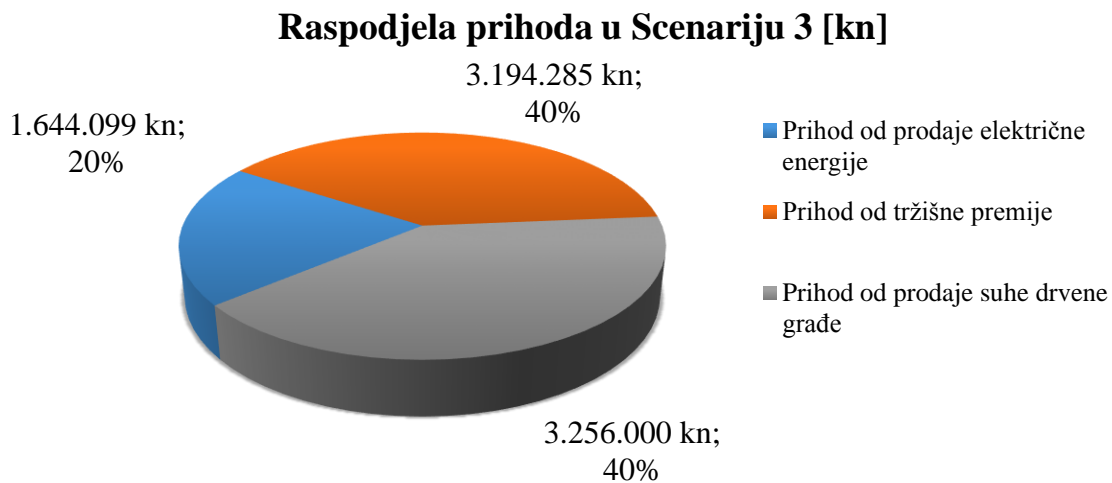
Rezultati tehničke analize Scenarija 3 pokazali su da ukupna iskoristivost energije biomase iznosi 47% što je slično kao i u prethodnim scenarijima. Razlozi relativno niske iskoristivosti su isti kao i oni u prethodnim scenarijima, a sukladno tome i tehnički prijedlozi za poboljšanje. U ekonomskom pogledu Scenarij 3 u usporedbi sa Scenarijem 2 investitoru donosi znatno veću dobit, te je vidljivo da i uz nisku iskoristivost energije biomase projekt vrlo isplativ. Neto sadašnja vrijednost iznosi 10.956.796 kn, a unutarnja stopa povrata iznosi 14%. U pogledu ostvarivanja prihoda u ovom se scenariju najviše prihoda ostvaruje od prodaje sušene drvene građe, dok je prihod od tržišne premije neznatno manji. Rezultate tehno-ekonomske analize Scenarija 3 prikazuje Tablica 10., a strukturu prihoda prikazuje Slika 23.

**Tablica 10. Rezultati tehno-ekonomske analize Scenarija 3**

Proizvodnja električne energije [MWh/god]	6.480
Prodaja električne energije [MWh/god]	6.480
Proizvodnja topline [MWh/god]	28.800
Toplina iskorištena za sušenje drva [MWh/god]	6.545
Toplina iskorištena za sušenje goriva [MWh/god]	6000
Potrošnja biomase [t/god]	11.428
Ukupni stupanj djelovanja [%]	47%
Prihod od prodaje električne energije [kn/god]	1,644.099
Prihod od tržišne premije [kn/god]	3,194.285
Prihod od sušenja građe [kn/god]	3,256.000
Troškovi goriva [kn/god]	2,200.000
Održavanje [kn/god]	247.000
Ukupno [kn/god]	5.627.166
Investicija [kn]	25,561.920

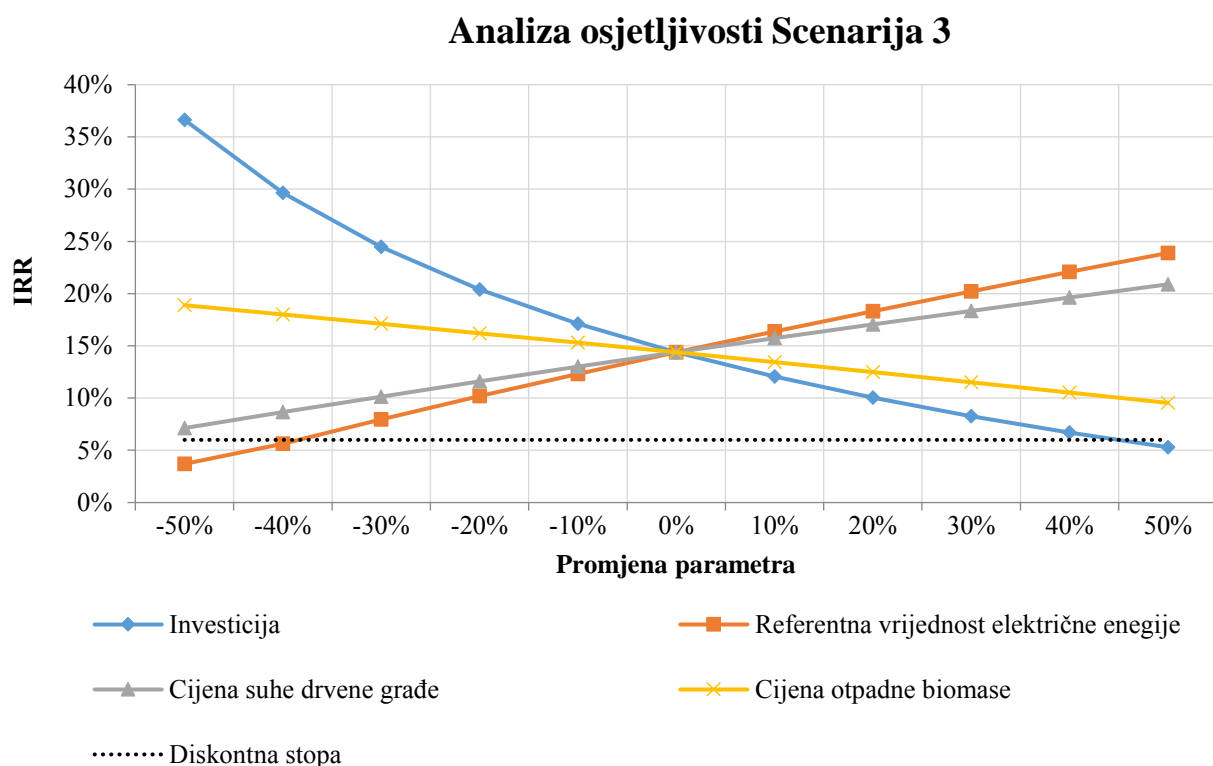


IRR [%]	14%
NPV [kn]	10,956.796
Diskontirani period povrata [god]	6,6



**Slika 23. Raspodjela prihoda u Scenariju 3**

Analiza osjetljivosti Scenarija 3 koju prikazuje Slika 24. pokazuje da kao i u prethodnom scenariju na isplativost projekta najviše utječe promjena visine investicije. Drugi najutjecajniji parametar je referentna vrijednost električne energije što je i očekivano s obzirom na visoki udio tržišne premije u ukupnim prihodima. Utjecaj promjene cijene suhe drvene građe i otpadne biomase imaju nešto blaži utjecaj. Iz dijagrama analize osjetljivosti vidljivo je pri pojedinačnoj promjeni ulaznih parametara od 30% u negativnom i pozitivnom smjeru projekt i dalje ekonomski opravdan. Ako postoji tržište za veću količinu osušene drvene građe ovaj scenarij je zasigurno kvalitetno i isplativo rješenje.



**Slika 24. Analiza osjetljivosti Scenarija 3**

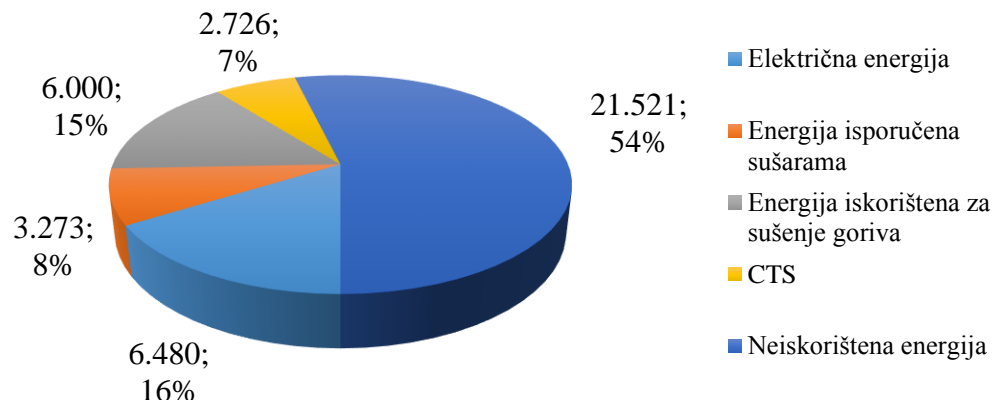
#### 6.2.4. Scenarij 4

Iz rezultata koje prikazuje Tablica 11. vidljivo je da je i u ovom scenariju ukupna iskoristivost energije biomase niska te iznosi 46%. Osnovni razlog je veliko vršno opterećenje u odnosu na manju potrošnju topline tijekom perioda grijanja. Strukturu potrošnje energije prikazuje Slika 25. I u ovome scenariju je količina neiskorištene energije značajna i postoji mogućnost za njeno iskorištavanje, ali bez analize dinamike sustava nije moguće odrediti dodatni kapacitet sušara. Nadalje, važno je napomenuti kako je u scenariju pretpostavljeno stopostotno priključivanje stanovnika na CTS što ne mora biti slučaj. U Krasnom je realno za očekivati da se stanovnici griju na vlastitu biomasu što je jeftinije u odnosu na prosječnu godišnju cijenu grijanja na CTS koja bi prosječno iznosila oko 6.000 kn. Samim time mogu se očekivati još manje gustoće toplinske potrošnje i niži prihodi.

**Tablica 11. Rezultati tehno-ekonomske analize Scenarija 4**

Proizvodnja električne energije [MWh/god]	6.480
Prodaja električne energije [MWh/god]	6.480
Proizvodnja topline [MWh/god]	28.800
Toplina iskorištena u sušarama [MWh/god]	3.276
Toplina iskorištena za sušenje goriva [MWh/god]	3.245
Toplina iskorištena u CTS-u [MWh/god]	2.726
Toplina iskorištena za sušenje goriva [MWh/god]	4.320
Potrošnja biomase [t/god]	11.428
Ukupni stupanj djelovanja [%]	46
Prihod od prodaje električne energije [kn/god]	1.644.099
Prihod od tržišne premije [kn/god]	3.194.285
Prihod od sušenja građe [kn/god]	1.221.000
Prihod od CTS-a [kn/god]	373.196
Troškovi goriva [kn/god]	2.200.000
Održavanje [kn/god]	442.363
Ukupno [kn/god]	3.770.217
Investicija [kn]	26.236.360
IRR [%]	5,53%
NPV [kn]	-527.257
Diskontirani period povrata [god]	10,5

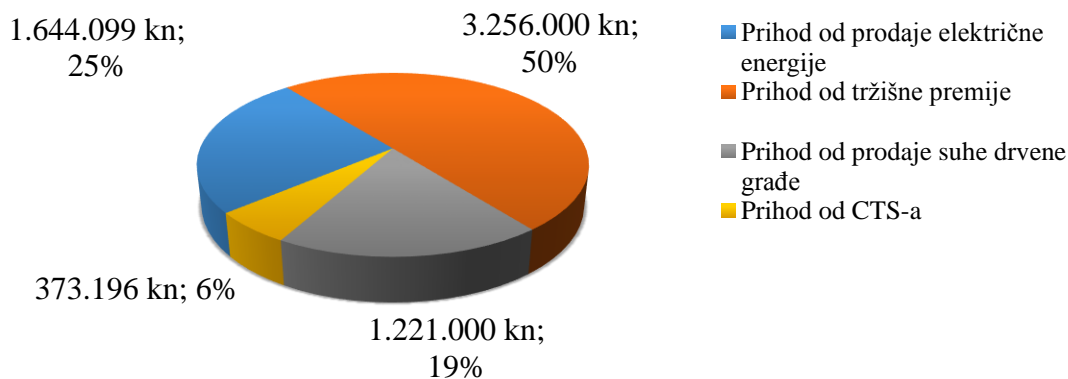
### Raspodjela korištenja energije u Scenariju 4 [MWh]



**Slika 25. Raspodjela korištenja energije u Scenariju 4**

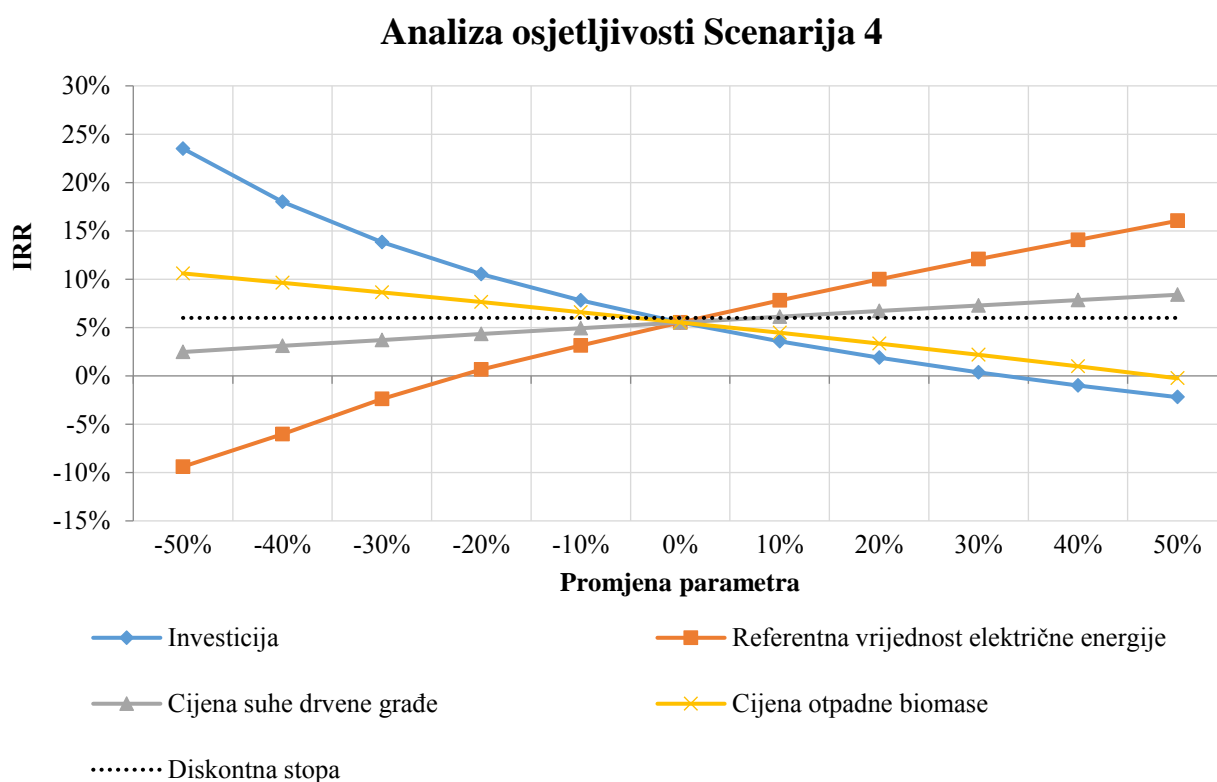
Scenarij 4 je malo ispod granice isplativosti s unutarnjom stopom povrata od 5,58%. Relativno visoko ulaganje u CTS, te relativno niski godišnji prihod negativno djeluju na isplativost projekta. Uspoređujući Scenarij 4 sa Scenarijem 3 može se zaključiti da je korištenje otpadne topline za sušenje drvene mase značajno isplativije nego izgradnja CTS-a i isporučivanje toplinske energije korisnicima u blizini u slučaju kada je gustoća toplinskih potreba mala. Strukturu prihoda u Scenariju 4 pokazuje .

### Raspodjela prihoda u Scenariju 4 [kn]



**Slika 26. Raspodjela prihoda u Scenariju 4**

Slika 27. prikazuje analizu osjetljivosti Scenarija 4 na promjenu glavnih ulaznih parametara. Iz dijagrama je vidljivo da u ovom scenariju najveći utjecaj na isplativost projekta ima promjena referentne vrijednosti električne energije s obzirom na to da prihod od tržišne premije iznosi 50% ukupnih prihoda. Nakon referentne vrijednosti sljedeći najutjecajniji parametar je visina investicije, dok promjena cijena suhe drvene građe i otpadne biomase imaju blaži utjecaj.



**Slika 27. Analiza osjetljivosti Scenarija 4**

Tablica 12. u nastavku daje sintezu tehno-ekonomske analize svih scenarija.

**Tablica 12. Sinteza rezultata tehno-ekonomske analize**

Scenarij	1	2	3	4
<b>Dodatno sušenje drvene građe</b> [m <sup>2</sup> /god]	3.300	3.300	8.800	3.300
<b>Iskorištena energije iz biomase</b>	47%	47%	48%	46%
<b>Investicija [kn]</b>	17,000.000	17,000.000	25,561.920	26,236.360
<b>IRR</b>	-11%	8%	14%	5,53%
<b>NPV [kn]</b>	-10,268.300	1,515.998	10,561.920	-527.257
<b>DPP [god]</b>	23	7,5	6,6	10,5

### 6.3. Bioheat Profitability Assessment Tool

Alat za izračun parametara goriva pokazao se vrlo korisnim budući da preciznije određuje ogrjevnu vrijednost goriva koja je za potrebe ovog rada uzeta iz literature kao prosječna. Godišnji trošak goriva za Scenarij 1 izračunat je pomoću alata i razlikuje se za 7,32% u odnosu na proračun. Uzrok takve razlike su različiti podaci o faktorima pretvorbe iz volumena u masu koji značajno ovise o postotku vlažnosti biomase.

Alatom za procjenu isplativosti nije moguće provesti analizu jer, kao što je ranije navedeno, on prvenstveno služi za proračun ušteda prilikom zamjene kotla na fosilna goriva kotlom na biomasu. Unatoč tome provedena je usporedba vrijednosti korištenih u proračunu s vrijednostima dobivenima alatom koristeći karakteristične primjere izolirane i neizolirane kuće kao i uprosječene vrijednosti ukupne površine i potrošnje. Usporedbu rezultata prikazuje Tablica 13. Značajnija razlika primjetna je jedino u godišnjoj potrošnji energije neizolirane kuće, a uzrok je različit podatak o prosječnoj potrošnji. U ostalim kategorijama iznosi se značajnije ne razlikuju te se može zaključiti da je alat vrlo koristan za okvirni proračun prilikom izbora kotlovskog postrojenja.

**Tablica 13. Usporedba rezultata proračuna i alata Bioheat Profitablity Assessment Tool**

		<b>Proračun</b>	<b>Alat</b>
<b>Kuća s fasadom 196 m<sup>2</sup></b>	Potrošnja [MWh]	26,13	29,00
	Snaga [kW]	21,56	21
<b>Neizolirana kuća 244 m<sup>2</sup></b>	Potrošnja [MWh]	64,04	46,00
	Snaga [kW]	39	36
<b>CTS</b>	Potrošnja [MWh]	2,16	2,0
	Snaga [kW]	1,6	1,5

## 7. ZAKLJUČAK

Tehnička analiza scenarija ukazala je na relativnu nisku iskoristivost energije biomase u iznosu manjem od 50%. Prilikom izrade analize nije bila poznata dinamika procesa sušenja drva te su korištene vrijednosti toplinske potrošnje iz literature pri čemu je nazivna snaga proizvodnog postrojenja odabrana tako da je u svakom trenutku zadovoljeno vršno toplinsko opterećenje potrošača. Samim time analizom dinamike sušenja moguće je u pojedinim scenarijima dodatno povećati iskoristivost i time poboljšati ekonomsku sliku projekta.

Rezultati analize scenarija pokazali su da je gradnja ORC postrojenja na biomasu u svrhu iskorištavanja i prodaje električne energije, te korištenja otpadne topline za vlastite potrebe neisplativa bez subvencioniranja. Osnovni razlozi su; visoki investicijski trošak ORC modula, visoka cijena otpadne biomase i niska tržišna cijena električne energije. Subvencioniranjem nepovratnim sredstvima u iznosu od 55% moguće je pokriti troškove ulaganja u projekt u periodu od 10 godina.

Subvencioniranjem tržišnom premijom moguće je ostvariti dobit pri čemu period povrata investicije ovisi o ugovorenom iznosu tržišne premije koji je jednak ili niži od referentne vrijednosti električne energije. U rezultatima je vidljivo da postrojenje veće snage dugoročno ostvaruje veću dobit, tj. ima veću stopu povrata. Analizom osjetljivosti utvrđeno je da isplativost projekta značajno ovisi o visini investicije i referentnoj vrijednosti električne energije jer najveći dio prihoda dolazi od tržišne premije.

Mapiranjem toplinskih potreba u neposrednoj blizini proizvodnog pogona utvrđena je vrlo niska specifična potrošnja toplinske energije što je i karakteristično za rijetko naseljena mjesta kojima dominiraju obiteljske kuće. Samim time izgradnja centraliziranog toplinskog sustava opterećuje projekt, te mu značajno umanjuje vrijednost.

Najisplativijim rješenjem pokazalo se kogeneracijsko postrojenje nazivne snage ORC-a 900 kWe koje koristi toplinsku energiju za vlastite potrebe tj. za sušenje drvene građe koja donosi visoku vrijednost. Ako postoji tržište za prodaju suhe građe ovaj scenarij je potrebno dublje analizirati.



Ugradnju ORC modula snage 550 kWe potrebno je razmotriti u kontekstu analize dinamike potrošnje topline jer i ovaj scenarij ekonomski opravdan te postoji mogućnost povećanja kapaciteta sušara, a time i godišnjih prihoda.

Bioheat Profitability Assessment Tool jednostavan je alat za okvirni proračun snage kotlovskog postrojenja, ali nije primjeren za analizu složenijih scenarija. U pogledu izračuna ogrjevnosti goriva, toplinskog opterećenja objekata i snage kotla vrlo je koristan i dovoljno točan za orijentacijske proračune.

## **ZAHVALA**

Ovaj rad izrađen je u suradnji s pilanom Krasno, te se ovim putem zahvaljujem gospodinu Ivici Kataliniću i dr.sc. Ivici Toljanu, dipl.ing.el. na ustupljenim podacima.

Ovaj rad izrađen je u sklopu projekta RESFLEX financiranog od strane Hrvatske zaklade za znanost (pod šifrom 3300), u sklopu projekta PLANHEAT financiranog od strane Europske komisije (broj ugovora: 723757), te u sklopu projekta COOLHEATING financiranog od strane Europske komisije (ugovor broj: 691679)

## LITERATURA

- [1] Paris agreement [Online] Dostupno: [http://unfccc.int/paris\\_agreement/items/9485.php](http://unfccc.int/paris_agreement/items/9485.php) (zadnji pristup: 25.8.2017.)
- [2] Labudović, B.: Osnove primjene biomase, Energetika marketing d.o.o., Zagreb, 2012.
- [3] Lončar D., Krajačić G., Vujanović M.: Podrška developerima- primjeri najbolje prakse za kogeneraciju na drvenu biomasu, CTT, Zagreb, 2009.
- [4] Zakon o obnovljivim izvorima energije i visokoučinkovitoj kogeneraciji *NN 100/15*
- [5] Statistički ljetopis 2016., Državni zavod za statistiku Republike Hrvatske, Zagreb, 2016.
- [6] Turboden [Online], Dostupno: <https://www.turboden.com/>, (zadnji pristup: 25.8.2017.)
- [7] Registar OIEKPP [Online] Dostupno: <http://oie.mingorp.hr/default.aspx?id=24>, (zadnji pristup – 5.8.2017.)
- [8] District Heating [Online] Dostupno: <http://district-heating.danfoss.com/home/#/> (zadnji pristup 28.8.2017.)
- [9] Komerački Z., Marović M.: Razvitak toplinarstva u Hrvatskoj od 2000. do 2025., HEP Toplinarstvo
- [10] Energija u Hrvatskoj 2013, EIHP, Zagreb, 2013.
- [11] Plan razvoja toplinarstva u Hrvatskoj [Online] Dostupno: [https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/croatia\\_report\\_eead\\_art\\_141\\_hr.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/croatia_report_eead_art_141_hr.pdf) (zadnji pristup 25.8.2017.)
- [12] Toplana Pokupsko [Online] Dostupno: <http://pokupsko.hr/otvorena-prva-toplana-na-biomasu-u-hrvatskoj/> (zadnji pristup 8.8.2017.)
- [13] Goić, R.: Zakon o OIEiVIK i Pravilnik o korištenju OIEiVIK-podloge s predavanja, MINGO, 2016.

- [14] Čikić, A.: Termoenergetska postrojenja i toplinifikacijski sustavi u funkciji obrade drva (sušenje i parenje)-podloge s predavanja, Hrvatska komora inženjera strojarstva, Varaždin 2011.
- [15] Pušić, T.: Završni rad, FSB, Zagreb 2017.
- [16] Standardizacija određivanja koeficijenata za obračun korisnih površina i korisnih vrijednosti površina; Hrvatsko društvo sudskih vještaka, Zagreb 2014.
- [17] Tocci L. et all: Small Scale Organic Rankine Cycle (ORC): A Techno-Economic Review, Energies, 2017.
- [18] Dorotić, H.:Diplomski rad, Zagreb 2016.
- [19] Bioheat Profitability Assesment Tool [Online] Dostupno:  
<http://www.bioenergy4business.eu/bioheat-profitability-assessment-tool/>
- [20] Krasno polje [Online] Dostupno: <https://www.fininfo.hr/Poduzece/Pregled/pilana-krasno/Detaljno/28398> 3.9.2017.
- [21] Shema ORC postrojenja na biomasu, [Online] Dostupno:  
<http://www.energikontorsydost.se/a/unik-satsning-pa-smaskalig-kraftvarme-hos-ronneby-miljoteknik> 3.9.2017.
- [22] South Pool [Online ] Dostupno: <http://www.bsp-southpool.com/home.html> ,(zadnji pristup 15.9.2017.)
- [23] Subvencioniranje proizvodnje električne energije u Njemačkoj; [Online] Dostupno:<http://www.res-legal.eu/search-by-country/germany/single/s/res-e/t/promotion/aid/premium-tariff-i-market-premium/lastp/135/> (zadnji pristup 2.9.2017.)
- [24] HEP cijene toplinske energije, [Online] Dostupno:  
[http://toplinarstvo.hep.hr/toplinarstvo/kupci/cijene/CJENIK\\_CTS\\_OSIJEK](http://toplinarstvo.hep.hr/toplinarstvo/kupci/cijene/CJENIK_CTS_OSIJEK)
- [25] Natječaj za dodjelu bespovratnih sredstava [Online] Dostupno:  
<https://esavjetovanja.gov.hr/ECon/MainScreen?entityId=5532>, (zadnji pristup 21.9.2017.)

## **PRILOZI**

CD-R disc